



République du Bénin

Université d'Abomey-Calavi

Faculté des Sciences Agronomiques

Ecole Doctorale des Sciences Agronomiques

Thèse de doctorat unique ès-Sciences agronomiques

Spécialité :

Aménagement et Gestion des Ressources Naturelles

**Gestion de la fertilité des sols pour
une meilleure productivité dans les
systèmes de culture à base d'igname
au Bénin**

Présentée par

Raphiou MALIKI

Directeur de thèse: **Prof. Dr. Ir. Brice SINSIN**

Professeur titulaire des Universités du CAMES, Conservation des Ressources Naturelles,
Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi

Jury:

Président : Professeur Adam AHANCHEDE

Rapporteur : Professeur Brice A. SINSIN

Examineur : Professeur Karimou Jean-Marie AMBOUTA

Examineur : Professeur Y. Mawuena D. GUMEDZOE

Examineur : Professeur Pascal HOUNGNANDAN

Examineur : Professeur Clément AGBANGLA

Examineur : Professeur Alexandre DANSI

Résumé

En Afrique de l'Ouest et au Bénin en particulier, la production traditionnelle de l'igname est basée sur les systèmes itinérants de défriche sur brûlis des jachères naturelles causant la déforestation, la dégradation et la baisse de la productivité des sols. Dans le but de contribuer à la sédentarisation de la culture de l'igname pour la sauvegarde des forêts, des alternatives ont été mises au point dans le cadre de la Recherche-Développement avec les jachères améliorées (*Aeschynomene histrix*, *Mucuna pruriens* var *utilis*, *Gliricidia sepium*) utilisées comme précédents culturaux à l'igname. Les systèmes traditionnels de production d'igname *Dioscorea rotundata* tardive- 'Kokoro' (rotation jachère à *Andropogon gayanus*-igname; rotation maïs + 100 kg N₁₄P₂₃K₁₄ + 50 kg urée-igname) ont été comparés aux systèmes promus par la recherche intégrant les légumineuses (rotation *Aeschynomene histrix* /maïs + 100 kg N₁₄P₂₃K₁₄ + 50 kg urée – igname ; rotation *Mucuna pruriens* var *utilis*/maïs + 100 kg N₁₄P₂₃K₁₄ + 50 kg Urée – igname) au cours des campagnes 2002-2003 et 2004-2005 dans quatre villages au Centre du Bénin (Miniffi, Gomè, Akpéro et Gbanlin). Les systèmes améliorés adaptés par les petits producteurs (rotation maïs+*Aeschynomene*+*Gliricidia*-igname, rotation maïs+*Aeschynomene*-igname et rotation maïs+*Aeschynomene*+sorgho-igname) ont été comparés chacun à leur système traditionnel de référence (rotation jachère arbustive longue-igname sur défriche-brûlis, rotation jachère à *Andropogon gayanus*-igname et rotation maïs+sorgho-igname) au cours des campagnes 2007-2008 et 2009-2010 dans huit villages (Adjanoudoho, Akpéro, Boubou, Dani, Gbanlin, Gomè, Magoumi et Miniffi). Trois variétés d'igname (*Dioscorea rotundata* précoce, *Dioscorea alata* tardive et *Dioscorea rotundata* tardive) ont été testées dans les systèmes adaptés. L'étude propose une estimation de l'impact agronomique de la gestion des matières organiques. Elle vise une meilleure connaissance des facteurs influençant la production dans les systèmes à légumineuses. Les facteurs principaux du rendement de l'igname sont la production de matière sèche des précédents culturaux, les conditions de fertilité des sols et du climat (pluviométrie). Le bilan net d'azote est positif dans les systèmes à légumineuses et négatif dans les systèmes traditionnels de production d'igname. Les systèmes intégrant les légumineuses herbacées améliorent les propriétés physico-chimiques des sols et montrent une productivité de la terre, de la main d'œuvre et du capital supérieure à celles des systèmes traditionnels. Le système agroforestier à *Gliricidia* montre une productivité de la terre plus élevée mais plus exigeant en main d'œuvre. Dans les systèmes à légumineuses, la variabilité des rendements d'une part, l'écart entre le rendement obtenu et l'optimum d'autre part sont réduits. L'adoption des systèmes est limitée par des contraintes d'ordre technique et institutionnel.

Mots clés : Adoption; Agriculture durable; Agriculture itinérante sur brûlis; Intensification économique; Protection environnementale; Sédentarisation de la culture de l'igname

Summary

In West Africa and Benin in particular, the traditional yam-based cropping systems (shifting cultivation and slash-and-burn) contribute to the deforestation, land degradation and low soil productivity. With the aim of designing more sustainable yam-based cropping systems, alternative systems were implemented in the framework of Research-Development with improved legume fallows (*Aeschynomene histrix*, *Mucuna pruriens* var *utilis*, *Gliricidia sepium*) preceding yam. Traditional yam-based cropping systems with late maturing *Dioscorea rotundata* -‘Kokoro’ (1-year fallow of *Andropogon gayanus*-yam rotation, Maize+ 100 kg N₁₄P₂₃K₁₄ + 50 kg Urea –yam rotation) were carried out in comparison with systems promoted by the research (*Aeschynomene histrix* /maize intercropping + 100 kg N₁₄P₂₃K₁₄ + 50 kg Urea –yam rotation and *Mucuna pruriens* var *utilis*/maize intercropping + 100 kg N₁₄P₂₃K₁₄ + 50 kg Urea –yam rotation) in the 2002-2003 and 2004-2005 cropping seasons in four villages in Central Benin (Miniffi, Gomè, Akpéro and Gbanlin). Improved systems adapted by smallholders (maize+*Aeschynomene*+*Gliricidia*-yam (early fire of shrubs) rotation, maize+*Aeschynomene*-yam rotation and maize+*Aeschynomene*+sorghum-yam rotation) were conducted in comparison with their traditional yam-based systems respectively (long shrubby fallow-yam (slash-and-burn) rotation, *Andropogon gayanus*-yam rotation and maize+sorghum-yam rotation) in the 2007-2008 and 2009-2010 cropping seasons in eight villages (Adjanoudoho, Akpéro, Boubou, Dani, Gbanlin, Gomè, Magoumi and Miniffi). Three yam varieties (early maturing *Dioscorea rotundata*, late maturing *Dioscorea alata* and late maturing *Dioscorea rotundata*) were tested in the adapted systems. The study provides an estimate of the agronomic impact of organic matter management. This aims a better understanding of factors influencing the production in yam-based cropping systems with legumes. The main factors of the yam performance are the dry matter production of the preceding sequence crops, the soil fertility and climate (rainfall) conditions. The net nitrogen balance is positive in yam-based cropping systems integrating legumes and negative in usual systems. Yam-based cropping systems with herbaceous legumes improve the soil physicochemical properties and have more a land productivity, labor and capital than those of usual systems. Agroforestry system with *Gliricidia* shows the highest soil productivity but requires much more labour than other systems. In systems with legumes, yields variability on the one hand, the gap to optimum yields on the other hand are reduced. The adoption of yam-based systems with legumes is limited by technical and institutional constraints.

Keywords: Adoption; Environmental protection; Intensification; Sedentary yam-based cropping; Slash-and-burn agriculture; Sustainable agriculture

Certification

*Je certifie que ce travail a été réalisé par Monsieur **Raphiou MALIKI** pour l'obtention du Diplôme de doctorat unique ès-Sciences agronomiques. Spécialité: Aménagement et Gestion des Ressources Naturelles de la Faculté des Sciences Agronomiques (FSA) de l'Université d'Abomey-Calavi (UAC) au Bénin.*

Prof., Dr. Ir. Brice SINSIN

Professeur titulaire des Universités du CAMES

Conservation des Ressources Naturelles

Dédicace

Je dédie ce travail à :

- *mes enfants Kissimatou Morènikè, Mohamed Ridwane et Touraya Allakè,*
- *mon épouse Falilatou,*
- *ma mère,*
- *mes frères et sœurs et,*
- *mon feu père.*

Remerciements

Au terme de ce travail, je voudrais témoigner toute ma gratitude à tous ceux qui m'ont encouragé à me lancer dans cette entreprise et en particulier:

- Prof. Brice A. SINSIN, pour ses exhortations depuis plusieurs années et aussi pour avoir accepté d'encadrer et de diriger le présent travail.
- les membres du jury pour leur contribution scientifique très précieuse au document de thèse: Professeur Adam AHANCHEDE, Professeur Karimou Jean-Marie AMBOUTA, Professeur Y. Mawuena D. GUMEDZOE, Professeur Pascal HOUNGNANDAN, Professeur Clément AGBANGLA et Professeur Alexandre DANSI.
- tous les membres du comité de thèse, les coopérants français du CIRAD, de l'IRD et autres personnes ressources pour leur contribution appréciable au présent travail: Dr Eric MALEZIEUX (Co-directeur), Dr Philippe VERNIER, Dr Laurent PARROT, Dr Denis CORNET, Dr Jacques LANÇON, Dr Bruno BARBIER, Professeur Anselme ADEGBIDI, Mme Cécile Fovet RABOT, Professeur Jean GANGLO, Professeur Romain Glèlè KAKAI, Professeur Rigobert TOSSOU, Professeur Davo Simplicie VODOUHE, Professeur Roch MONGBO, Dr ASSOGBADJO Achille, Dr Esaïe GANDONOU et Dr Emile HOUNGBO.
- le Service de Coopération et de l'Action Culturelle (SCAC) de l'ambassade de France au Bénin, par le biais de Mme Mathilde HEURTAUX, pour son appui indéfectible à l'octroi et au suivi de la bourse du gouvernement français pour cette thèse gérée par l'organisme EGIDE.
- la coopération française pour son appui financier et technique à ces travaux par l'intermédiaire du programme CORUS.
- l'Agence Française de Développement dans le cadre du Projet d'Appui à la Diversification des Systèmes d'Exploitation (PADSE), le Fonds International de Développement Agricole (FIDA) dans le cadre du Projet de Développement des Plantes à Racines et Tubercules (PDRT), l'Organisation des Nations-Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) dans le cadre du projet TCP/BEN/3002 (A) "Appui à la production durable d'ignames adaptées aux marchés" et l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) dans le cadre du projet BEN 5005 « Improving Maize and Yam-Based Cropping Systems and Soil Fertility » pour leurs appuis financiers et techniques à ces travaux.
- l'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne (A.S.E.C.N.A.) de Cotonou par le biais de Monsieur Julien DA SILVA pour son appui pour la collecte des données météorologiques.

- les laboratoires de l'INRA et du CIRAD de Montpellier (Mme Karine ALARY, Dr Didier BRUNET) pour leur appui technique à l'analyse physico-chimique des échantillons.
- Dr David Y. ARODOKOUN, Directeur Général de l'Institut National des Recherches Agricoles du Bénin (INRAB) pour avoir facilité le travail.
- Prof. Guy Apolinaire MENSAH et Dr Kouessi AÏHOU respectivement Directeur du CRA-A et du CRA-Centre de l'INRAB pour leur soutien moral et leur conseil.
- Prof. Roger Adéniyi BOKOU de l'UAC; Dr Robert ASIEDU et Dr Martin JEMO de l'IITA Ibadan pour leur contribution.
- les chercheurs et techniciens du Laboratoire des Sciences du Sol, Eau et Environnement (LSSEE) du CRA-A de l'INRAB (M. Sylvestre TOSSAVI, M. Justin Z. HOUNDANTODE, Professeur Anastase AZONTONDE, Professeur Mouïnou IGUE) pour leur appui technique aux traitements et analyse des échantillons.

Je me fais un devoir de saluer ici, toutes les autorités de l'INRAB et de la FSA pour leurs concours.

J'adresse mes salutations et mes remerciements à tous les amis et collègues du Département d'Aménagement et Gestion des Ressources Naturelles (AGRN) en particulier : Carole AVOCEVOU, Caroline HOUNKPETIN, Fifanou VODOUHE et Siaka KODJO.

Que le Collègue Mouïssou TOUKOUROU et les techniciens des sites de la Recherche-Développement dans le Département des Collines trouvent ici le fruit de leur contribution dans le cadre du développement des systèmes améliorés de production à base d'igname.

Je m'en voudrais de ne pas remercier les producteurs et productrices du Bénin pour leur contribution très appréciable au développement des technologies pour la gestion durable des ressources naturelles.

Acronymes

ADRD-ESA:	Evolution des Systèmes Agricoles vers l'Agriculture et le Développement Rural Durable
AFD:	Agence Française de Développement
AGRN:	Aménagement et Gestion des Ressources Naturelles
AIEA:	Agence Internationale de l'Energie Atomique
A.S.E.C.N.A.	Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne
BMRS:	Base Mondiale de Référence des Sols
CAMES:	Conseil Africain et Malgache pour l'Enseignement Supérieur
CeCPA:	Centre Communal pour la Promotion Agricole
CENATEL :	Centre National de Télédétection
CeRPA :	Centre Régional pour la Promotion Agricole
CIRAD :	Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CORUS :	Coopération en Recherche Universitaire et Scientifique
CRA-A:	Centre de Recherches Agricoles d'Agonkanmey
CRA-Centre :	Centre de Recherches Agricoles du Centre
D.E.A. :	Diplôme d'Etudes Approfondies
EPIC:	Environmental Policy Integrated Climate
FAO :	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
FIDA :	Fonds International de Développement Agricole
FSA :	Faculté des Sciences Agronomiques
GLM :	Modèle linéaire Général
ICRA :	Centre International de Recherche Agricole orientée vers le Développement
IITA :	Institut International d'Agriculture Tropicale
INRA :	Institut National de la Recherche Agronomique
INRAB :	Institut National des Recherches Agricoles du Bénin
IRD :	Institut de Recherche pour le Développement
ISTRC:	International Society for Tropical Root Crops
LARES:	Laboratoire d'Analyse et de Recherche et d'Expertise Sociale
LRI :	Laboratoire des Radio-isotopes
LSSEE :	Laboratoire des Sciences du Sol, Eaux et Environnement

MAEP :	Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche
MOS :	Matière Organique du Sol
ONG :	Organisation Non Gouvernementale
PADSE :	Projet d'Amélioration et de Diversification des Systèmes d'Exploitation
PDRT :	Projet de Développement des Plantes à Racines et Tubercules
ProCGRN :	Programme de Conservation et de Gestion des Ressources Naturelles
R-D :	Recherche-Développement
RGPH3 :	Troisième Recensement Général de la Population et de l'Habitation
RTE :	Référentiel Technico-économique
SCAC :	Service de Coopération et de l'Action Culturelle
SCV :	Système de Culture sur Couverture Végétale
SNRA :	Système National de Recherche Agricole
SPSS :	Statistical Package for Social Science
TCP :	Projet de Coopération Technique
UAC :	Université d'Abomey-Calavi
UNIHO:	Université de Hohenheim

Table des matières

Partie 1:	Introduction générale.....	1
Chapitre 1.1.	Contexte.....	2
Chapitre 1.2.	Cadre conceptuel de la recherche.....	7
Chapitre 1.3.	Caractéristiques du milieu d'étude.....	20
Chapitre 1.4.	Aperçu sur les concepts.....	33
Partie 2:	Systèmes promus par la recherche intégrant les légumineuses herbacées (essais conduits de 2002 à 2005).....	49
Chapitre 2.1.	Evaluating yam-based cropping systems using herbaceous leguminous plants in the savannah transitional agro-ecological zone of Benin.....	50
Chapitre 2.2.	Sedentary yam-based cropping systems with legumes as solutions for soils conservation and forests protection in West Africa.....	71
Chapitre 2.3.	Productivity of yam-based systems with herbaceous legumes and short fallows in the Guinea-Sudan transition zone of Benin.....	103
Chapitre 2.4.	Yam yield variability and gaps as affected by the soils, crop management and rainfall in the Guinea-Sudan transition zone of Benin.....	119
Chapitre 2.5.	Contingent constraints of soil conservation innovations: case of yam-based systems with herbaceous legumes in the Guinea-Sudan transition zone of Benin.....	149
Partie 3:	Systèmes adaptés par les petits producteurs (essais conduits de 2007 à 2010): Agronomic and economic performances of yam-based systems with shrubby and herbaceous legumes adapted by smallholders.....	168
Partie 4:	Discussions générales.....	190
	Conclusion générale.....	214
	Références bibliographiques.....	222
	Curriculum Vitae.....	248

Partie

1

Introduction générale

R. Maliki

Contexte

L'igname est une plante à tubercules de la zone tropicale qui constitue la base de l'alimentation de plus de 300 millions de personnes à travers le monde (FAO, 2008). En Afrique de l'Ouest, la production de l'igname joue un rôle primordial dans la sécurité alimentaire des populations rurales et urbaines (FAO, 2002). Plus de 90% de la production mondiale provient de la "ceinture de l'igname-yam belt" en Afrique de l'Ouest qui s'étend du centre de la Côte d'Ivoire, y compris la Guinée jusqu'aux chaînes montagneuses du Cameroun (FAO, 2002). La production d'igname a connu une croissance soutenue estimée à plus de 3% par an durant les trois dernières décennies et sa consommation s'est élargie à des populations traditionnellement non consommatrices (FAO, 2002).

L'igname représente au Bénin une culture vivrière de première importance (Figure 1).

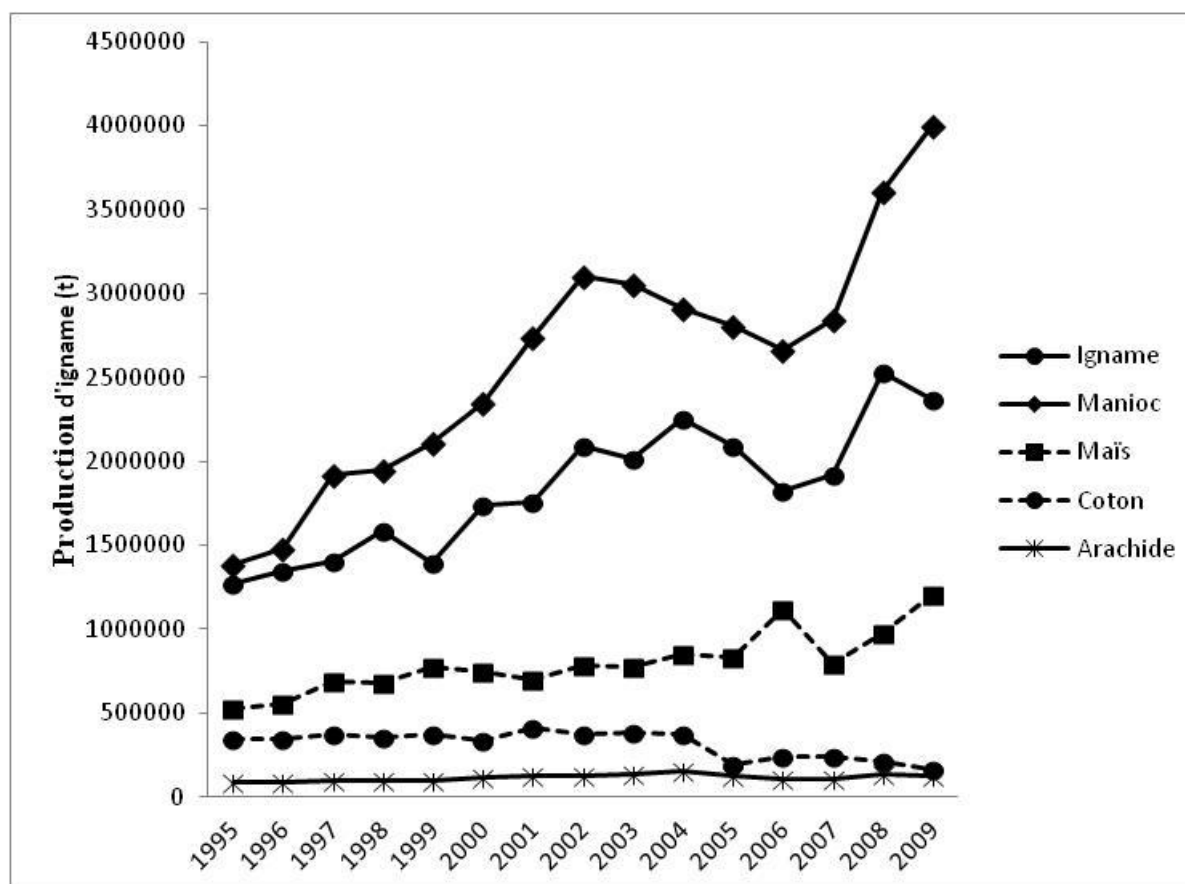


Figure 1 : Evolution de la production en tonnes de quelques cultures au Bénin

Source: FAOSTAT, 2011

La croissance annuelle de la production est de 8%, passant de 1,7 millions de tonnes en 2001-2002 à 2,4 millions de tonnes en 2006-2007 (MAEP, 2007). Au cours de la

compagne 2004-2005, la production d'igname au Bénin s'élevait à 2.257.254 tonnes sur une superficie emblavée estimée à 166.921 hectares, soit 1,4 % du territoire national (MAEP, 2007). La production nationale a été de 2.370.863 tonnes au cours de la campagne 2009 – 2010. Ce tonnage important fait du Bénin le quatrième producteur mondial d'igname, après le Nigéria, la Côte d'Ivoire et le Ghana. L'igname constitue la deuxième culture vivrière la plus importante au plan national, après le manioc (FAOSTAT, 2011). La zone de production de l'igname au niveau national s'étend du Sud à la latitude de Kandi et couvre plus de 70% de la superficie totale nationale (Dansi *et al.*, 2003). Le bassin de production principal du pays est le nord (le Borgou et l'Atacora) avec notamment la ville de Djougou comme marché important, qui alimente tout le pays en igname. La zone du Zou-centre est un bassin secondaire avec comme marché principal la ville de Glazoué.

L'igname bénéficie d'une image prestigieuse et sa demande, surtout en zone urbaine, croît sans cesse. Outre sa valeur alimentaire, l'igname est et reste au Bénin une plante d'une importance culturelle attestée par les fêtes annuelles d'igname pratiquées dans de nombreuses aires culturelles du pays (Dansi *et al.*, 2003). Elle revêt un caractère socio-économique et culturel très important au Nord et au Centre du pays. De même la culture de l'igname occupe une place de choix dans les habitudes alimentaires des populations et constitue une denrée de prestige dans plusieurs localités, surtout dans les relations inter familiales. Chez le Baatonu, le Mahi ou le Nagot par exemple, c'est un grand honneur de pouvoir offrir de gros et beaux tubercules à sa belle famille, à son ami ou à son frère à l'occasion d'un baptême, d'un mariage ou d'une cérémonie mortuaire (Zannou, 2006). L'igname est essentiellement commercialisée en tubercule frais et consommée, selon les variétés, bouillie, braisée ou pilée (foutou) (Zannou, 2006).

L'igname apparaît à de nombreux décideurs politiques comme une culture cumulant de nombreux handicaps. La croissance de la production s'est faite essentiellement de façon extensive par défriche-brûlis au détriment des zones boisées, pratique fortement dommageable pour l'environnement. En effet, pour la satisfaction des besoins alimentaires, les paysans mettent en cultures des formations forestières secondaires (savane arborée, savane boisée et forêt claire, forêt dense dégradée ou ouverte) résultant de précédents défrichements. Il s'agit donc d'un système extensif avec comme technique prépondérante la culture itinérante sur brûlis sans intrants sur des jachères de 2 à 20 ans ou plus. La croissance de la production de l'igname est liée à l'accroissement de la superficie cultivée, la migration vers les zones de production de l'igname (la zone centre du Bénin) où il y a encore quelques réserves

forestières. La production a ainsi plus que doublé du fait de l'expansion des superficies et sur les 30 dernières années (Figure 2).

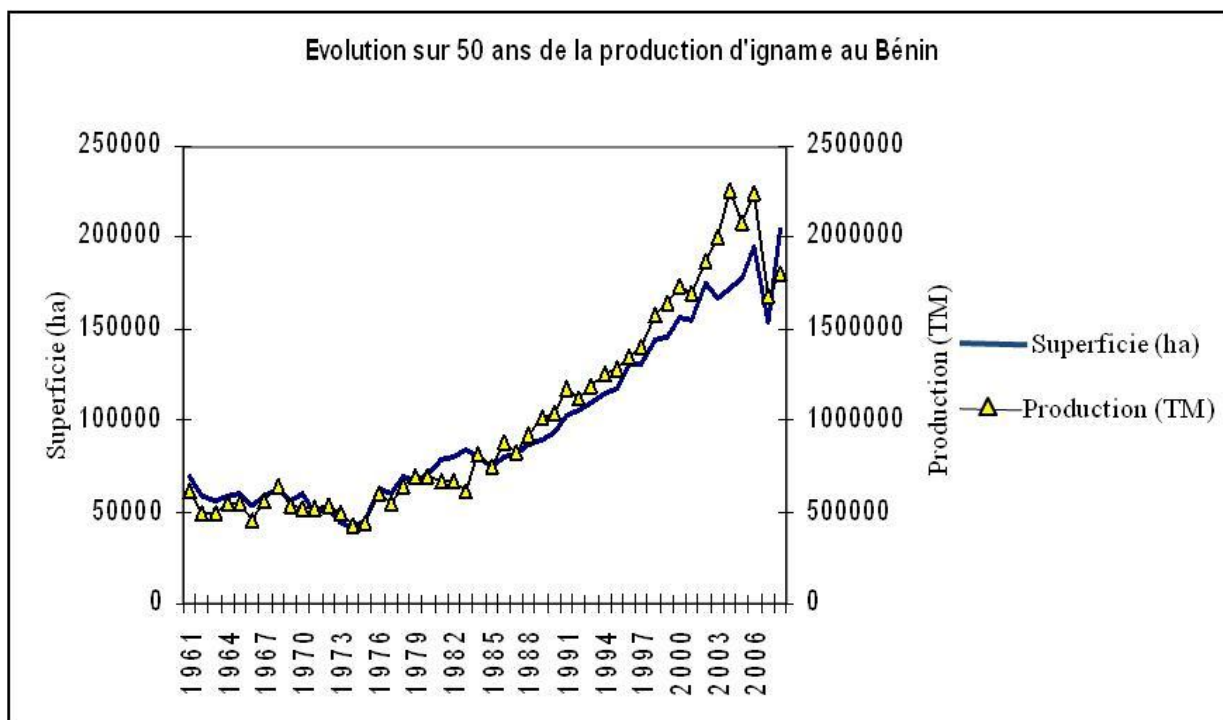


Figure 2 : Evolution de la superficie et de la production de l'igname au Bénin

Source: FAOSTAT, 2011

Les arbres surexploités pour l'agriculture (incinération des arbres pour le tuteurage de l'igname) et l'énergie domestique (production de charbon et de bois de chauffe) ne se renouvellent plus assez vite (Photos 1-3).



Photo 1: Incinération des arbres



Photo 2: Production du charbon



Photo 3: Déforestation de l'espace agricole

Les dernières réserves de terre de la région des savanes sont menacées de déforestation avec ses conséquences sur l'environnement. Des problèmes d'érosion surtout hydrique en

résultent. Ils sont amplifiés par la dégradation de la qualité physique des sols, ce qui induit un appauvrissement en matière organique. A terme, ce mode de production traditionnel est condamné par l'épuisement des ressources naturelles favorables (zones de jachères longues arborées). La prospérité économique de la filière s'obtient donc au prix d'une destruction des derniers lambeaux forestiers du Bénin.

A titre indicatif, de 1990 à 1995, le Bénin a perdu 298.000 ha de sa couverture forestière, ce qui correspond à une disparition moyenne d'environ 60.000 ha de forêt par an (Sinsin et Kampmann, 2010). Ainsi, la superficie forestière par habitant qui était de 1,63 ha en 1980 est passée à 0,87 ha en 1995, et elle devrait atteindre 0,29 ha en 2025, si les tendances actuelles se maintiennent (Schmidt-Soltau et Alimi, 2008). A cette perte des habitats s'ajoutent proportionnellement des pertes d'espèces. En conséquence, on assiste au cours de ces trois dernières décennies, à un rythme sans précédent de dégradation des ressources naturelles du pays. En outre, la déforestation sous les tropiques qui est à 60% occasionnée par l'agriculture de défriche sur brûlis libère directement 40 à 50% du carbone total à travers le brûlis de la biomasse (FAO, 2002). Il en résulte comme conséquences les émissions de carbone contribuant au réchauffement global de la terre, celui ci est vraisemblablement à la base des changements climatiques caractérisés entre autres par la variabilité saisonnière des précipitations (c'est-à-dire le retard des pluies, les poches de sécheresse plus ou moins longues) et les inondations. Dans ces différents cas, il y a la dégradation de la biodiversité (Dansie *et al.*, 2003).

En dehors des contraintes d'ordre pédoclimatique liées à la déforestation, de nombreuses autres contraintes s'inscrivent également qui ont amené certains auteurs à remettre en cause l'avenir des ignames comme aliment de base (Bell *et al.*, 2000). Il s'agit notamment des contraintes telles que les pathologies (viroses), l'inadaptation du matériel végétal, les pertes post-récolte, le temps de travail au champ et les coûts de la main-d'œuvre associée (44 % du coût total de production) (Nweke, 1991): il s'y ajoute la quantité élevée des semenceaux nécessaires dans la technique traditionnelle de multiplication des semenceaux d'igname (sevrage) et les coûts d'acquisition élevés de ces semenceaux (53 % du coût total de production) (Nweke, 1991). Ces contraintes ont pour corollaire la baisse du rendement de la culture et l'augmentation de ses coûts de production.

Les rendements nationaux, de l'ordre de 7 à 12 t ha⁻¹ sont encore faibles par rapport au potentiel de la plante estimé à 25 -30 t ha⁻¹ pour *Dioscorea* spp (Vernier et Dossou, 2003) et 60-70 t ha⁻¹ pour la même espèce en condition de terre très fertile (FAO, 2002).

En dépit de ces faiblesses, l'igname est loin d'être une culture en perte de vitesse (Dumont, 1997). De 1999 à 2003, l'igname a constitué le seul produit considéré comme économique avec un indice de consommation par habitant de 101,7 (FAO, 2003). L'igname s'avère très profitable aux agriculteurs qui en ont fait une culture marchande ainsi qu'aux acteurs en aval de la filière tant pour le tubercule frais que pour les cossettes. Selon Dumont et Vernier (1997), l'igname est visiblement une culture que les paysans ont su faire évoluer. « Alors qu'elle était naguère essentiellement destinée à l'autoconsommation, l'igname est largement devenue une culture commerciale » et souvent une source importante de revenus monétaires.

Il est urgent de développer avec les producteurs des alternatives techniques adaptées aux petits producteurs permettant une production durable de l'igname dans le cadre de systèmes de production sédentarisés sans la défriche-brûlis. Il faudra accroître substantiellement les investissements dans les technologies destinées à stimuler la productivité et une meilleure gestion des ressources pour réduire la pauvreté rurale et urbaine et maintenir la production agricole et le prix des denrées de base à des niveaux acceptables. Des alternatives pour la sédentarisation des systèmes de culture à base d'igname et la sauvegarde des forêts émergent grâce aux efforts combinés des agriculteurs et de la recherche. Les solutions préconisées portent sur les systèmes de culture en couloirs à base des engrais organiques (*Gliricidia sepium*) intégrant une culture subséquente igname (Kang et Reynolds, 1986 ; Budelman, 1991). Les engrais organiques d'origine végétale notamment les légumineuses améliorent les propriétés physiques et chimiques du sol et fournissent les éléments nutritifs indispensables aux plantes en assurant un stockage important des éléments fertilisants (Poulain, 1982).

Cadre conceptuel de la recherche

Historique des systèmes de culture à base d'igname intégrant les légumineuses

La dégradation des sols due à l'agriculture itinérante sur brûlis, l'épuisement des éléments minéraux du sol sont des menaces graves à la productivité agricole et identifiés en tant que causes importantes du déclin de rendements dans les systèmes de culture (Henao et Baanante, 2006). Il devient nécessaire d'améliorer la productivité de l'igname dans les systèmes de culture à base d'igname (O' Sullivan et Ernest, 2008).

Les activités de recherche se sont orientées vers des systèmes de culture qui combinent des agents fixateurs, de protection et de recyclage destinés à éviter tant une mise en jachère trop longue qu'une escalade dans les moyens appliqués pour maintenir la production. Le cas de culture en couloirs (alley-cropping) est connu pour avoir tenté une telle démarche. Ainsi, dans les années 1980, l'IITA en particulier a consacré beaucoup d'efforts aux systèmes de cultures en couloirs où la jachère naturelle est remplacée par une jachère plantée de légumineuses arbustives (*Gliricidia sepium*) et simultanée, associée aux cultures. Le système est du reste dérivé d'un système de culture autochtone nigérian développé par des producteurs d'igname. Ceux-ci défrichent de façon sélective et laissent dans leurs champs cultivés des plants d'*Acioa barteri* qui assurent une double fonction de tuteurs et de producteurs de biomasse (Floquet et al., 2001). Le système de culture en couloirs avec le *Gliricidia* a fait l'objet de recherche dans plusieurs structures de recherche et a été transféré en milieu rural (Kang et Reynolds, 1986 ; Kang and Mulongoy, 1987; Budelman, 1989, 1990, Atta-Krash et al., 1998 ; Akakpo et al., 1998, Floquet et al., 1998).

Les résultats insatisfaisants, pour ne pas dire l'échec de l'agriculture en couloirs ont été attribués pour une large part aux erreurs de conception des essais. Ainsi, l'interface arbustes-cultures appropriée n'est pas souvent prise en compte dans ces essais. Les travaux de recherche ont révélé que les tubercules se comportent mal sur les parcelles de culture en couloirs (Adegbola et Vlaar., 1998). La préoccupation des chercheurs a été en général le rendement (Adegbola et Vlaar., 1998). La pratique du système de culture en couloirs est contraignante selon les utilisateurs finaux surtout en ce qui concerne la main d'œuvre pour les émondages (Bernard et al., 1998). Lorsque les haies ne sont pas gérées convenablement (minimum quatre coupes), les rendements en maïs grain sur la majorité des parcelles de culture en couloirs sont inférieurs à ceux des parcelles témoins surtout en années de mauvaise pluviométrie (Akakpo et al., 1998). Rares sont les cas d'une augmentation des rendements

pour les cultures en couloirs (Broadhead, 2000 ; Tamélokpo *et al.*, 2007; Toose *et al.*, 2007; Dupraz, 2008; Hairiah *et al.*, 2010). Les travaux de Maliki *et al.* (2003) ont révélé que dans le système de haies (culture en couloirs), l'effet de compétition se déroule non seulement entre arbustes et culture mais aussi entre les arbustes qui interagissent pour la lumière et les éléments minéraux. Ceci entraîne une perte sensible de rendement et de surface cultivée si les haies ne sont pas gérées convenablement.

Des recherches participatives ont de même amélioré le système dans sa géométrie. Il est aujourd'hui bien connu que les technologies mises au point font l'objet de profonds réajustements de la part des producteurs confrontés à des contraintes diverses (de main d'œuvre, de superficie, de qualité des terres, de liquidités, etc.). Ainsi, sur la base des résultats scientifiques et des difficultés rencontrées sur le système de culture en couloirs à base de *Gliricidia sepium*, le dispositif a été adapté par les producteurs dans le cadre des activités de recherche-développement au Bénin. Dans l'ancien système igname-*Gliricidia*, l'igname est cultivée dans un arrangement de culture intercalaire, dans des couloirs de *Gliricidia sepium*. Les rangées d'arbustes sont séparées entre elles de 3 m (Photo 4).



Photo 4: Systèmes de culture en couloirs à base de *Gliricidia sepium* à forte densité (3m x 1m) pour la production d'igname à Dani (Commune de Savè)



Photo 5: Systèmes à écartement lâche de *Gliricidia sepium* (4m x 4m) en association avec *Aeschynomene histrix* pour la production d'igname à Miniffi (Commune de Dassa-Zoumè).

Sur la ligne, les plants de *Gliricida* sont distants de 1 m les uns des autres. Deux rangées de buttes d'ignames sont installées à l'intérieur des couloirs. L'arbre sert aussi bien de tuteur que pour la production d'émondes (Akakpo *et al.*, 1998). Le nouveau dispositif agroforestier est un système à écartement lâche d'arbustes de *Gliricidia sepium* (4m x 4m) soit une densité de 625 arbustes/ha renforcé par une légumineuse herbacée (Photo 5) contre 3333 arbustes (3m x

1m) dans le système de culture en couloirs dans le but d'accroître la biomasse fertilisante et réduire la charge de travail. La coupe des arbustes de *Gliricidia* est effectuée à 1,5 m du sol. Deux à trois élagages des arbustes sont réalisés durant le cycle de production de l'igname (Maliki, 2006).

Des variantes du nouveau système agroforestier ont été également développées par les producteurs dans la zone soudano-guinéenne au centre du Bénin: La pratique d'une seule coupe des arbustes de *Gliricidia* à 0,5 m du sol (Maliki *et al.*, 2002a); l'intégration des légumineuses alimentaires (arachide) dans le système agroforestier à base de *Gliricidia* (Maliki *et al.*, 2004); la pratique du feu précoce au pied des arbustes de *Gliricidia* permettant la suppression de la coupe, l'accumulation des feuilles sèches au sol et la régénération des arbustes pour le tuteurage des lianes d'igname (auto-reproductibilité); les systèmes sans arbustes de *Gliricidia* mais avec l'intégration des légumineuses herbacées (*Aeschynomene histrix*, *Mucuna pruriens* var *utilis*) dans les systèmes traditionnels (maïs ou maïs/sorgho) comme précédents culturels pour l'igname ont été développés par les producteurs dans la région centrale du Bénin.

Intérêt scientifique de l'étude

L'étude s'est déroulée dans le centre du Bénin, une région ayant une tradition établie en matière de production d'igname au Bénin. Avec la pression sur les terres, les systèmes itinérants basés sur la défriche-brûlis avec de hauts rendements d'igname deviennent quasi-impossibles. La déforestation liée à l'action anthropique a pour conséquence la disparition progressive des fronts pionniers et la dégradation des sols (baisse du statut organique et épuisement des éléments nutritifs des sols) (Igué, 2000 ; Agossou et Igué, 2002 ; Saidou, 2006).

L'ajustement du niveau des matières organiques du sol est un des effets et des rôles attendus des longues jachères. Les recherches anciennes reconnaissent unanimement cette propriété des jachères à végétation vigoureuse de stocker dans les horizons superficiels de la matière organique du sol et des sels minéraux issus de la fixation de l'azote, de la pluie ou du sous-sol, mais il existait déjà des nuances. Les jachères dégarnies et surexploitées étaient connues pour avoir un impact négatif identique à celui des cultures (Greenland et Nye, 1959; Piéri, 1989; Feller, 1995).

Plusieurs études citées par Balesdent (1996) rapportent que la matière organique du sol décroît dans les sols cultivés (dynamique régressive) (Figure 3).

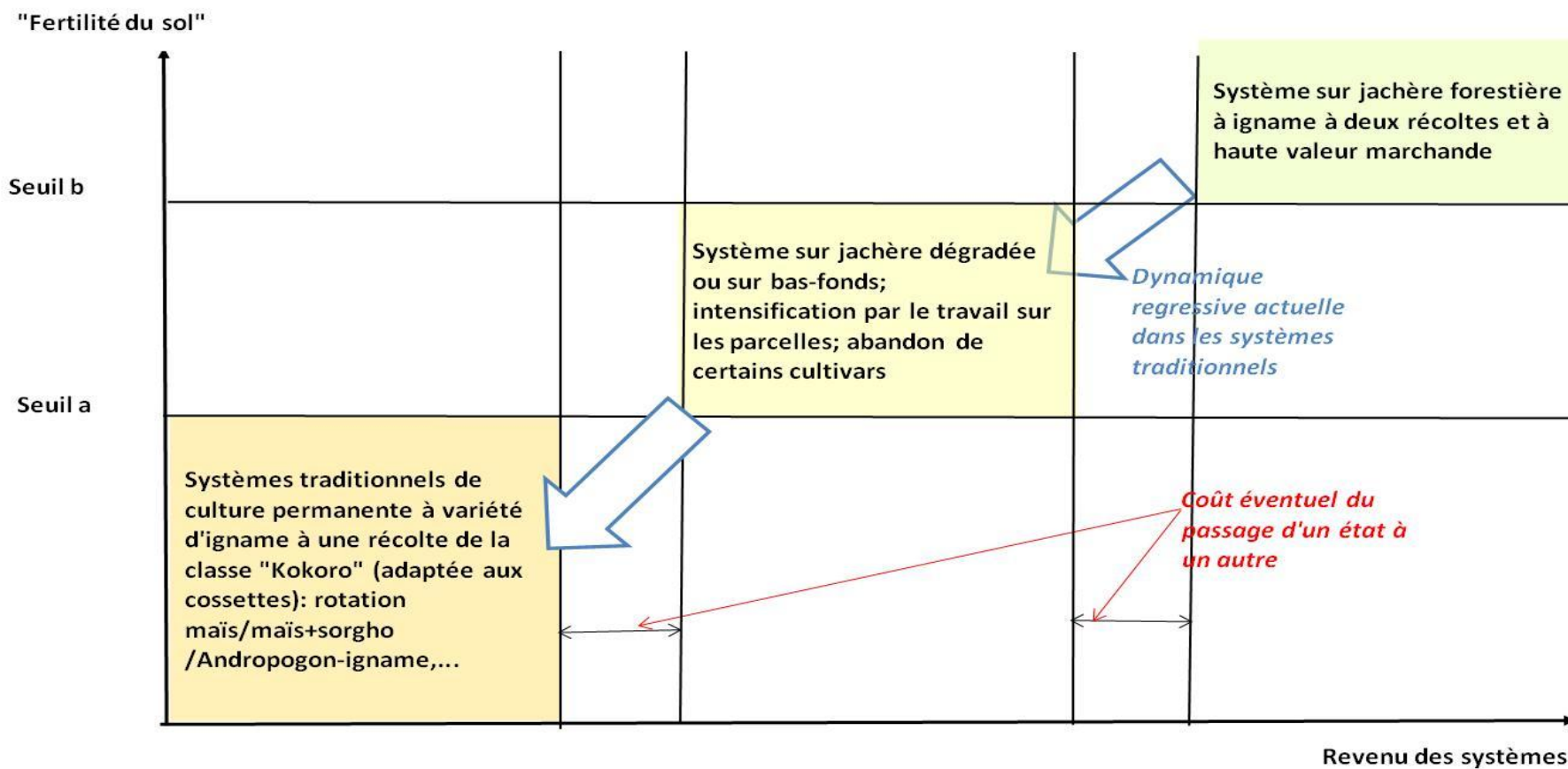


Figure 3 : Modèle théorique hypothétique des relations entre «fertilité» des sols et la productivité de l'igname dans les systèmes traditionnels dans la zone de transition soudano-guinéenne du Bénin

Source: Projet CORUS

Cette situation est probablement aggravée dans les systèmes de culture à base d'igname en raison de l'exigence de la plante en terre fertile (Degras, 1986; Carsky *et al.*, 2001; O'Sullivan et Ernest, 2008 ; Diby *et al.*, 2009 ; Frossard, 2009). Néanmoins, l'igname est maintenue dans les systèmes de culture, les paysans ayant initié divers modèles pour la culture sédentarisée de cette plante : rotation avec les céréales (maïs, sorgho) (c'est-à-dire 'Ekpoyiyo' en Yoruba) ou la jachère à *Andropogon gayanus* ('Fan' en Fon), la culture dans les bas-fonds, etc. (FAO, 1996; Vernier et Dossou, 2003; Tschannen *et al.*, 2005 ; Maliki, 2006). L'impact agronomique de ces systèmes de culture à base de l'igname dans cette région est mal connu.

Par ailleurs, depuis la fin des années 1980s, la gestion des matières organiques basée sur l'utilisation des légumineuses arbustives et herbacées est proposée aux paysans au Bénin (Akakpo *et al.*, 1998; Azontondé *et al.*, 1998 ; Bernard *et al.*, 1998; Floquet *et al.*, 1998, 2001; Carsky *et al.*, 2002; Maliki *et al.*, 1998, 2003). Les résultats de recherche ont révélé que les rotations intégrant les légumineuses contribuent directement à la constitution de la MOS qui joue de multiples fonctions dans le cadre de l'amélioration des caractéristiques physico-chimiques et biologiques des sols (Assogba, 1996; Azontonde *et al.*, 1998, Snapp *et al.*, 1998; Palm *et al.*, 2001; Bolinder, 2003; Adjei-Nsiah, 2007; Sanginga et Woomer, 2009). Diby *et al.* (2009) ont rapporté l'influence élevée de la matière organique du sol sur la croissance de la culture et la production des tubercules d'igname en jachère forêtière et en savane (Figure 4).

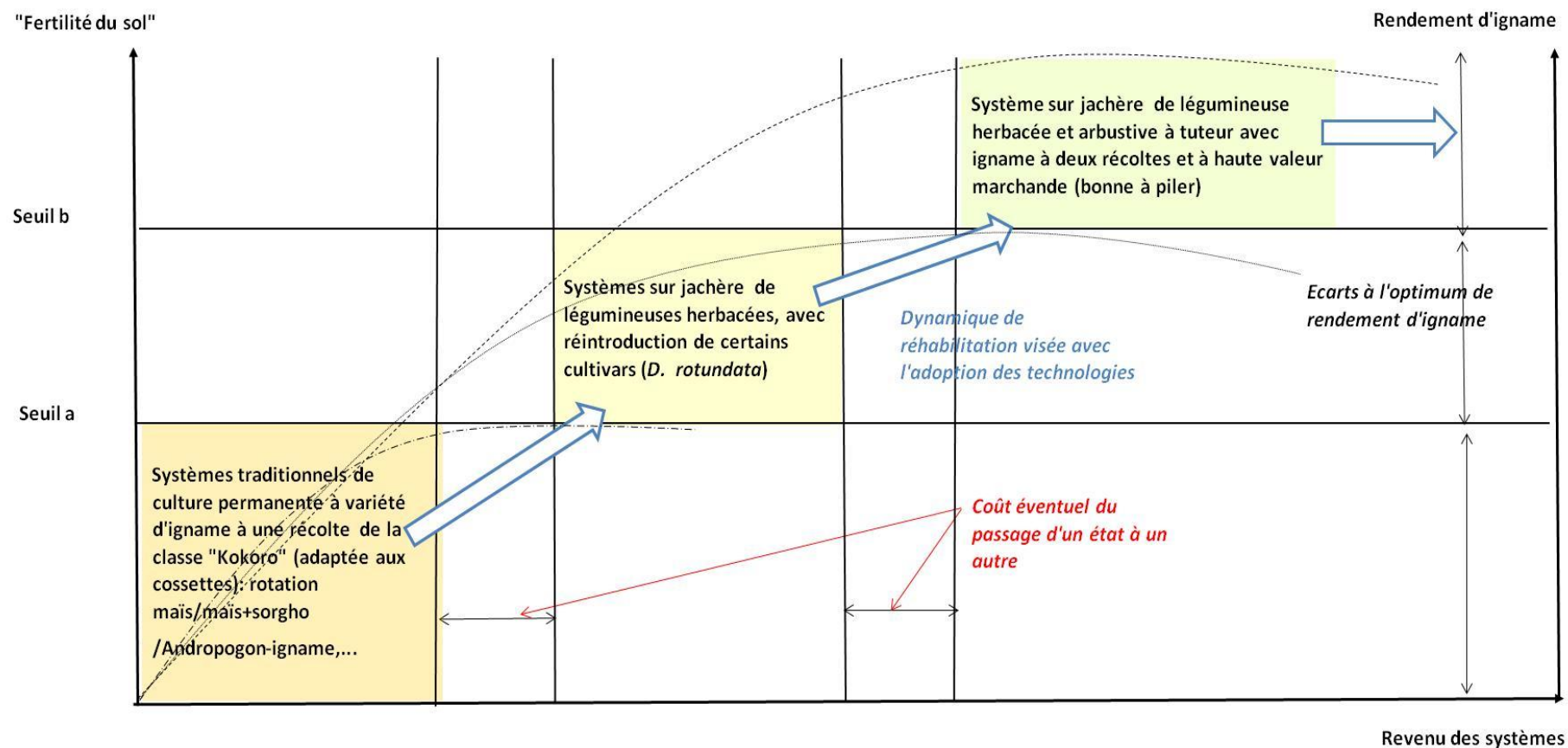


Figure 4 : Modèle théorique hypothétique des relations entre «fertilité» des sols et la productivité de l'igname dans les systèmes à légumineuses dans la zone de transition soudano-guinéenne du Bénin

Source: Projet CORUS

L'originalité de l'étude est d'avoir intégré dans le dispositif expérimental une première série d'adaptations par les producteurs des technologies à base d'igname intégrant les légumineuses. La question demeure en ce qui concerne la productivité et les facteurs limitant la production dans les systèmes de culture à base d'igname intégrant les légumineuses. L'impact des systèmes de culture à base d'igname intégrant les légumineuses va dépendre de leur capacité à restaurer la fertilité des sols, à améliorer la nutrition des plantes et partant, le rendement de la culture (igname).

L'évaluation de la performance en milieu réel de ces innovations dans le contexte des régions de forte tradition de production d'igname est rarement effectuée d'une manière détaillée. Les facteurs déterminant la variabilité et l'écart à l'optimum de rendement d'igname dans les systèmes de culture à base d'igname intégrant les légumineuses restent à explorer. Une meilleure compréhension s'avère nécessaire de l'importance relative des facteurs de gestion du sol et de la culture affectant le rendement et causant une grande variabilité de celui-ci dans les champs des petits exploitants. Les bilans minéraux sont souvent négatifs dans les systèmes de production des petits producteurs et de larges écarts à l'optimum de rendement sont observés (Vanlauwe & Giller, 2006). L'écart à l'optimum de rendement est généralement défini comme la différence entre le rendement réel et le rendement potentiel qui peut être réalisé dans une zone agro-écologique donnée (Vanlauwe & Giller, 2006). Pour des buts pratiques, il est cependant plus intéressant d'étudier l'écart entre le rendement réel et le rendement possible défini comme rendement maximum observé dans une zone agro-écologique dans un contexte donné de gestion améliorée de la fertilité du sol (Fermont *et al.*, 2009). La variabilité du rendement d'igname a été généralement attribuée à l'épuisement de la fertilité du sol (Diby *et al.*, 2009), aux parasites et maladies (Coyne *et al.*, 2006), aux décisions d'allocation de ressource des paysans (Nkonya *et al.*, 2005) et à leurs pratiques agronomiques (Mutsaers *et al.*, 1995), ou à des combinaisons de ces facteurs (Samake' *et al.*, 2006). Mais Ghosh *et al.* (1988), Ike & Inoni (2006) considèrent les retards des précipitations comme l'une des principales sources de déclin de la production d'igname. En effet, l'igname est exigeante en eau particulièrement après germination de la culture et puis entre les quatorzième et vingtième semaines de la croissance (Dansie *et al.*, 2003). Les décisions de gestion agronomique influencent l'efficacité d'utilisation des ressources (terres, intrants, eau, etc.) et par conséquent la productivité de la culture (Titttonell *et al.*, 2007). Les travaux de Maliki (2006) n'ont pas révélé de différence significative entre les systèmes traditionnels à base d'igname et ceux intégrant les légumineuses herbacées et arbustives quant aux maladies et ravageurs invertébrés au stade végétatif et à la récolte dans la zone d'étude.

L'étude permet de combler ces gaps de connaissances. C'est d'ailleurs l'intérêt principal de ce projet de thèse : elle permettra de produire des données qui peuvent être utilisées pour modéliser convenablement la relation entre la production des matières organiques, la fertilité des sols et leur conservation et les rendements des cultures dans la zone centre du Bénin.

Intérêt au plan socio-économique

Il est souhaitable de maintenir l'igname dans les systèmes pour renforcer la sécurité alimentaire du pays. Selon Igué (1974), les populations qui se nourrissent des tubercules, en particulier de l'igname, connaissent rarement des famines. En dehors du rôle nutritionnel, l'intérêt de l'igname par rapport aux céréales est surtout lié à sa faible sensibilité aux aléas climatiques, selon divers auteurs. En plus de cet avantage, sa vente est plus une source de revenus monétaires stables pour certaines populations rurales à cause de la demande de plus en plus croissante de cette culture en milieu urbain au Bénin. Elle fait certainement partie des productions qui contribuent à la réduction de la pauvreté rurale. Ces deux avantages (sécurité alimentaire, gains de revenus monétaires au profit des paysans) montrent que les pouvoirs publics ont un intérêt à adopter des options claires en faveur de la production durable de cette plante. Les résultats de cette étude peuvent être exploités pour faciliter la définition de pareilles options.

Intérêt pour la protection de l'environnement

Il apparaît opportun de stigmatiser que, contrairement aux pays industrialisés et aux pays fortement urbanisés, le grand responsable de la dégradation de l'environnement au Bénin reste jusqu'à présent l'agriculture (mis à part les problèmes de l'érosion côtière et des ordures ménagères). L'igname (culture vivrière) est désormais citée comme contribuant à la dégradation du sol et du couvert végétal tout comme le coton (De Haan, 1992). C'est dire que les efforts de l'état d'enrayer ou de limiter les effets néfastes des systèmes de culture sur l'environnement n'ont pu être soutenus (durables).

L'igname est pratiquée aujourd'hui dans le cadre de systèmes de culture (quasi) sédentarisés dans la zone d'étude, notamment sur des sites à statut organique plutôt fragile. Etant donné que c'est une plante très exigeante en éléments minéraux, une perpétuation de sa culture dans un tel contexte peut conduire à une dégradation irréversible des sols. Même si les

paysans ont déjà largement adapté les méthodes de cultures pour faciliter la continuation de la production, la phase d'irréversibilité pourrait intervenir assez rapidement (Figure 3). La promotion des technologies de restauration de la fertilité des sols devient donc clairement une urgence dans les zones de culture d'igname longtemps considérées comme étant épargnées par les problèmes de disponibilité de terres cultivables.

Par ailleurs, les populations ayant une tradition établie en matière de culture de l'igname ont tendance à se déplacer constamment à la recherche des friches et des longues jachères pour perpétuer la production de cette plante ; on rencontre régulièrement à l'extérieur des frontières de leurs localités. Cette course effrénée aux 'nouvelles' terres pour le maintien de la culture de l'igname fait partie des causes principales de la déforestation, et donc de la dégradation de l'environnement au Bénin. Les technologies de restauration de la fertilité des sols, en facilitant une culture (presque) sédentarisée de l'igname avec des rendements améliorés vont freiner ce besoin de conquête permanente de 'nouvelles' terres et réduire la déforestation.

L'effet des technologies durables de production agricole sur la réduction de la déforestation est largement démontré dans la littérature. Par exemple, selon Sanchez *et al.* (1990), un hectare de riz cultivé en appliquant des méthodes durables de production permet de protéger 11 hectares de terres contre la déforestation. Le prix Nobel Norman Borlaug (considéré comme le père de la révolution verte) a longuement insisté sur le rôle des technologies améliorées de production agricole dans la réduction de la déforestation ou de la dégradation de l'environnement (Borlaug, 2000). L'étude s'inscrit dans la même perspective et va produire des données qui peuvent être exploitées pour développer des interventions contre la déforestation.

Intérêt pour la domestication et la biodiversité

L'un des intérêts de ce travail comme sus mentionné est d'arriver à sédentariser la culture de l'igname et de freiner la destruction abusive de la forêt ou du couvert végétal. Un autre intérêt de ce travail, concerne la domestication ou l'ennoblissement de l'igname qui se poursuit même aujourd'hui grâce à la présence de fronts pionniers en voie de disparition et qui contribue à la valorisation de la biodiversité naturelle. Les paysans collectent des ignames sauvages dans la savane ou la forêt afin d'ensemencer leurs champs. La variété "Gnidou" par exemple a été domestiquée à partir de *Dioscorea parehensilis* dans la région de Tchèti au Centre du Bénin par les paysans de l'ethnie Nago-Fê (variante dialectale du Nago) il y a

environ trois décennies (Dansi *et al.*, 2003). *D. parehensis* se rencontre surtout dans les forêts et les galeries forestières. Les agriculteurs créent des variétés correspondant à de nouvelles combinaisons génétiques produites par la reproduction sexuée des ignames sauvages et cultivées. Ce système, qui associe reproduction sexuée et asexuée, permet de maintenir et de diffuser les plantes les plus intéressantes, tout en préservant la capacité d'évolution de l'igname cultivée. Or si la forêt disparaît, il serait difficile aux producteurs d'aller chercher de nouvelles espèces de *Dioscorea* dans la forêt pour les domestiquer ou les ennobler. Le pool variétal de l'igname est lié à un certain nombre de facteurs dont la domestication, la migration pour la conquête de terres propices pour l'igname, l'aptitude culturale des sols, la qualité organoleptique, la valeur commerciale et le cycle cultural de la variété (Floquet *et al.*, 2012). La zone d'étude dispose d'un pool de gène très large des variétés d'igname (Zannou, 2006). Les critères ethnobotaniques utilisés au Centre du Bénin dans la dénomination des ignames vont de la morphologie du tubercule (par exemple variété "Adigbrin" = "tubercule gros comme un tronc d'arbre") à ses qualités culinaires ("Kpakara" = "qui soulève le bol", foutou très tendre qui colle aux assiettes), ses conditions de cultures ("Mafobo" = "ne doit pas être laissé à un fainéant", variété exigeante en travaux d'entretien) ou même à ses vertus pharmacologiques ("Porchebim" = "seins de la femme", variété galactogène) (Dansi *et al.*, 2003). Dans tous les cas, la disparition de la forêt entraînera la perte de la domestication et l'érosion de la biodiversité de l'igname. Le présent travail s'inscrit pour freiner ce processus de dégradation par la promotion des systèmes de culture sédentarisés.

Questionnement scientifique

Plusieurs types de questionnement scientifique émergent:

- 1- Les systèmes adaptés à base d'igname intégrant les légumineuses peuvent-ils assurer des rendements d'igname plus élevés et stables que les systèmes traditionnels (igname après la défriche forestière sur brûlis, la jachère à *Andropogon gayanus*, le maïs ou maïs/sorgho...) et partant, limiter les risques de déforestation et de pénurie alimentaire?
- 2- Ces systèmes peuvent-ils également assurer une utilisation efficace des ressources et ainsi réduire l'impact environnemental?
- 3- Quelle est leur gestion et efficacité économique?

- 4- Quelle est leur faisabilité (contraintes liées à l'adoption de tels systèmes par les producteurs/productrices)?

Hypothèses de l'étude

Les hypothèses de l'étude s'articulent comme suit:

- (i) les facteurs principaux du rendement de l'igname sont la production de matière sèche des précédents culturaux, les conditions de fertilité des sols et du climat (pluviométrie);
- (ii) le bilan net d'azote est positif dans les systèmes de culture à base d'igname intégrant les légumineuses et négatif dans les systèmes traditionnels de production d'igname;
- (iii) les systèmes de production à base d'igname intégrant les légumineuses améliorent les propriétés physico-chimiques des sols en comparaison avec les systèmes traditionnels de production d'igname;
- (iv) les systèmes de production à base d'igname intégrant les légumineuses ont une productivité de la terre, de la main d'œuvre et du capital supérieure à celles des systèmes traditionnels;
- (v) Dans les systèmes à légumineuses, la variabilité des rendements d'une part, l'écart entre le rendement obtenu et l'optimum sont réduits.
- (vi) Malgré les performances agronomiques des systèmes à base d'igname intégrant les légumineuses, leur adoption est limitée par des contraintes d'ordre technique et institutionnel.

Objectif de l'étude

L'étude propose une estimation de l'impact agronomique de la gestion des matières organiques. Elle vise une meilleure connaissance de la productivité de l'igname et des facteurs influençant la production dans les systèmes de cultures intégrant les légumineuses. En particulier, elle recherche à évaluer l'ampleur des ressources organiques mobilisées suite à l'intégration dans les systèmes de culture des légumineuses arbustives (*Gliricidia sepium*) et herbacées (*Aeschynomene histrix* et *Mucuna pruriens* var *utilis*). Ensuite, l'étude tente de relier les ressources organiques additionnelles obtenues aux indicateurs de fertilité ou de

conservation des sols et aux rendements des cultures. L'attention est surtout portée sur le rendement de l'igname, les données empiriques ayant été collectées dans une zone de forte tradition de culture de l'igname (le centre du Bénin). La compréhension de l'importance relative des facteurs déterminant la production est une étape nécessaire pour guider la conception d'interventions de développement ciblées pour améliorer la productivité de l'igname.

La forme de gestion des matières organiques envisagée implique des coûts (main d'œuvre, notamment) et des produits additionnels pour le paysan. Il est appliqué une analyse de rentabilité simplifiée (effets sur les revenus nets courants/actualisés) pour tester sa viabilité économique. Il est également proposé une évaluation contingente des contraintes à l'adoption des pratiques de gestion ou de restitution des matières organiques suggérées.

Objectifs spécifiques

- Déterminer les biomasses et les quantités d'éléments recyclés ou exportés par les cultures dans les systèmes de culture à base d'igname intégrant les légumineuses;
- Estimer le bilan net d'azote dans les systèmes de culture à base d'igname intégrant les légumineuses;
- Evaluer l'impact des systèmes de production à base d'igname intégrant les légumineuses sur le rendement de l'igname et les propriétés physico-chimiques des sols;
- Evaluer la rentabilité économique des systèmes de culture à base d'igname intégrant les légumineuses;
- Déterminer la variabilité et l'écart à l'optimum de rendement d'igname dans les systèmes de culture intégrant les légumineuses;
- Analyser les contraintes à l'adoption des systèmes de culture à base d'igname intégrant les légumineuses.

Le présent document est structuré en quatre parties :

- la première partie est relative à l'introduction générale;
- la deuxième partie porte sur les systèmes promus par la recherche intégrant les légumineuses herbacées (essais conduits de 2002 à 2005) et comporte cinq chapitres :
 - le chapitre 2.1. met en exergue les performances agronomiques des systèmes à base de légumineuses herbacées promus par la recherche (*Aeschynomene histrix*,

- Mucuna pruriens* var *utilis*) + engrais minéraux appliqués sur le maïs (100 kg NPK 14-23-14 + 50 kg d'urée) comparées aux systèmes traditionnels de référence (précédent jachère d'1 an d'*Andropogon gayanus*, précédent maïs): biomasse aérienne recyclée des précédents culturaux, exportation, recyclage des éléments minéraux et bilan net d'azote des précédents culturaux);
- le chapitre 2.2. montre les effets des systèmes intégrant légumineuses herbacées sur le sol (matière organique et les macroéléments du sol), puis de l'état du sol sur le rendement de l'igname;
 - le chapitre 2.3. est consacré à l'évaluation des éléments minéraux recyclés dans les feuilles et exportés par les tubercules d'igname, la productivité de la terre, de la main d'œuvre et du capital dans les systèmes, l'effet des systèmes sur les changements au niveau de la fertilité des sols) ;
 - le chapitre 2.4. met en relief les déterminants de la variabilité et les écarts à l'optimum des rendements de l'igname dans les systèmes intégrant les légumineuses herbacées (*Aeschynome histrix*, *Mucuna pruriens* var *utilis*) comparés aux systèmes traditionnels de référence (précédent jachère d'un an d'*Andropogon gayanus*, précédent maïs);
 - le chapitre 2.5. porte sur les contraintes liées à l'adoption des technologies intégrant les légumineuses;
- la troisième partie porte sur les systèmes améliorés adaptés par les petits producteurs intégrant les légumineuses herbacées et arbustives (essais conduits de 2007 à 2010). Elle compare la productivité des systèmes adaptés par les petits producteurs notamment les précédents culturaux intégrant les légumineuses arbustives et herbacées (*Gliricidia*+maïs+*Aeschynomene*, maïs+*Aeschynomene*, maïs+sorgho+*Aeschynomene*) à celle des systèmes locaux à base d'igname (défriche forestière sur brûlis, jachère d'un an à *Andropogon gayanus*, maïs/sorgho, maïs);
 - la quatrième partie est relative aux discussions générales.

Caractéristiques du milieu d'étude

La zone de production de l'igname au Bénin s'étend entre le 7^{ème} et 11^{ème} degré de latitude Nord, soit depuis la région de Bohicon au Centre jusqu'au-delà de Kandi au Nord (Azehoun-Pazou, 2005). L'étude a été conduite dans la région soudano-guinéenne au Centre du Bénin (Figure 5).

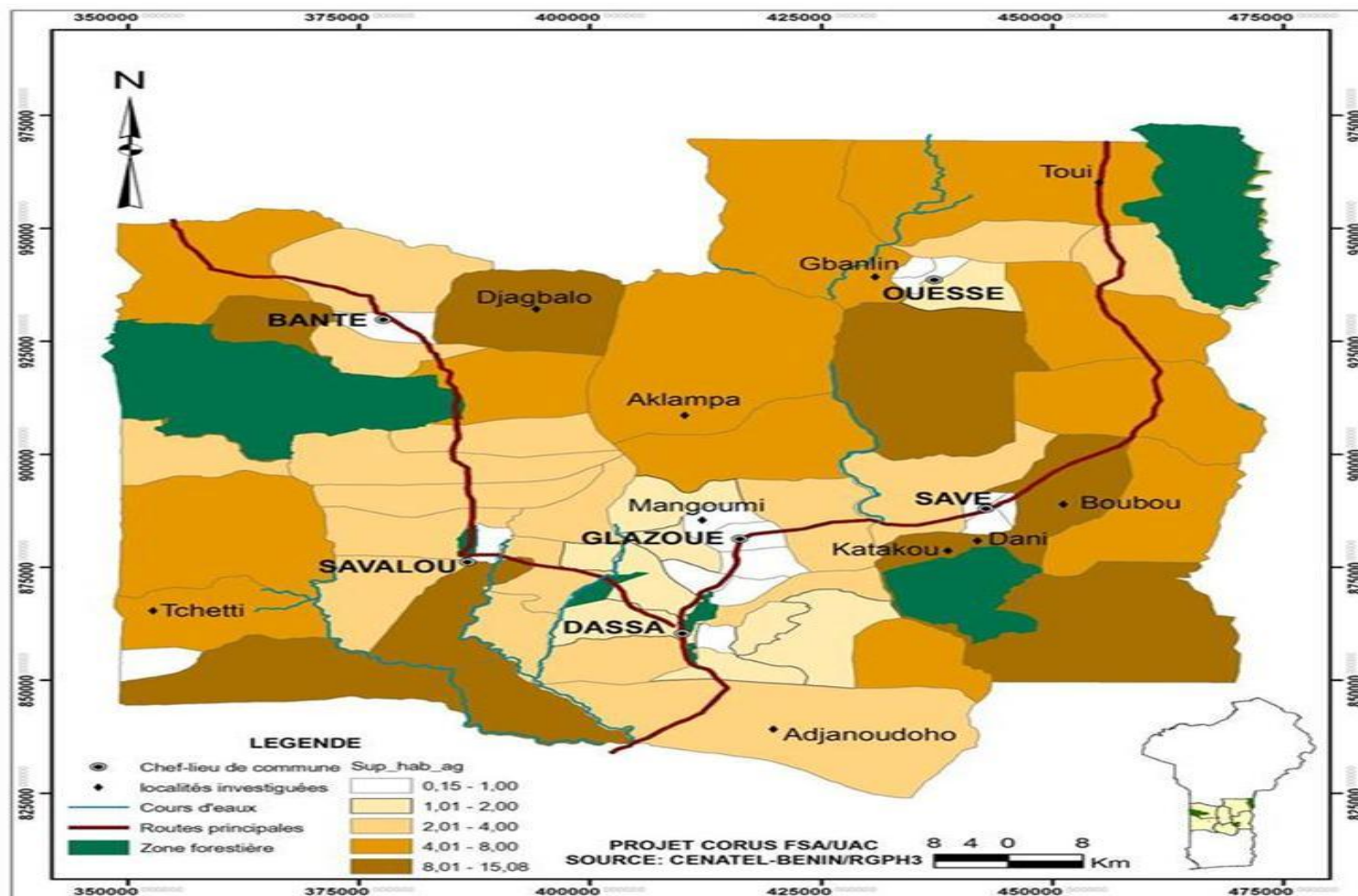


Figure 5 : Carte de localisation géographique du département des Collines

Elle est comprise entre la latitude 7°45' et 8°40' Nord et la longitude 2°20' et 2°35' Est. La zone est caractérisée par des durées d'occupations humaines et densités de peuplement différenciées. On distingue une zone à faible pression démographique (Savalou, Bantè, Savè et Ouessè) avec une densité moyenne de 25 habitants/km² et une zone à pression démographique relativement forte avec une densité de 49 habitants/km² (Dassa-Zoumé, Glazoué) (LARES, 2001). La région jouit d'un climat de type soudano-guinéen. Elle constitue une zone de transition entre le Sud à régime pluviométrique bimodal et le Nord à régime pluviométrique monomodal (Figure 6). Les précipitations annuelles moyennes varient entre 900 mm et de 1200 mm avec une répartition inégale des pluies (Figure 7).

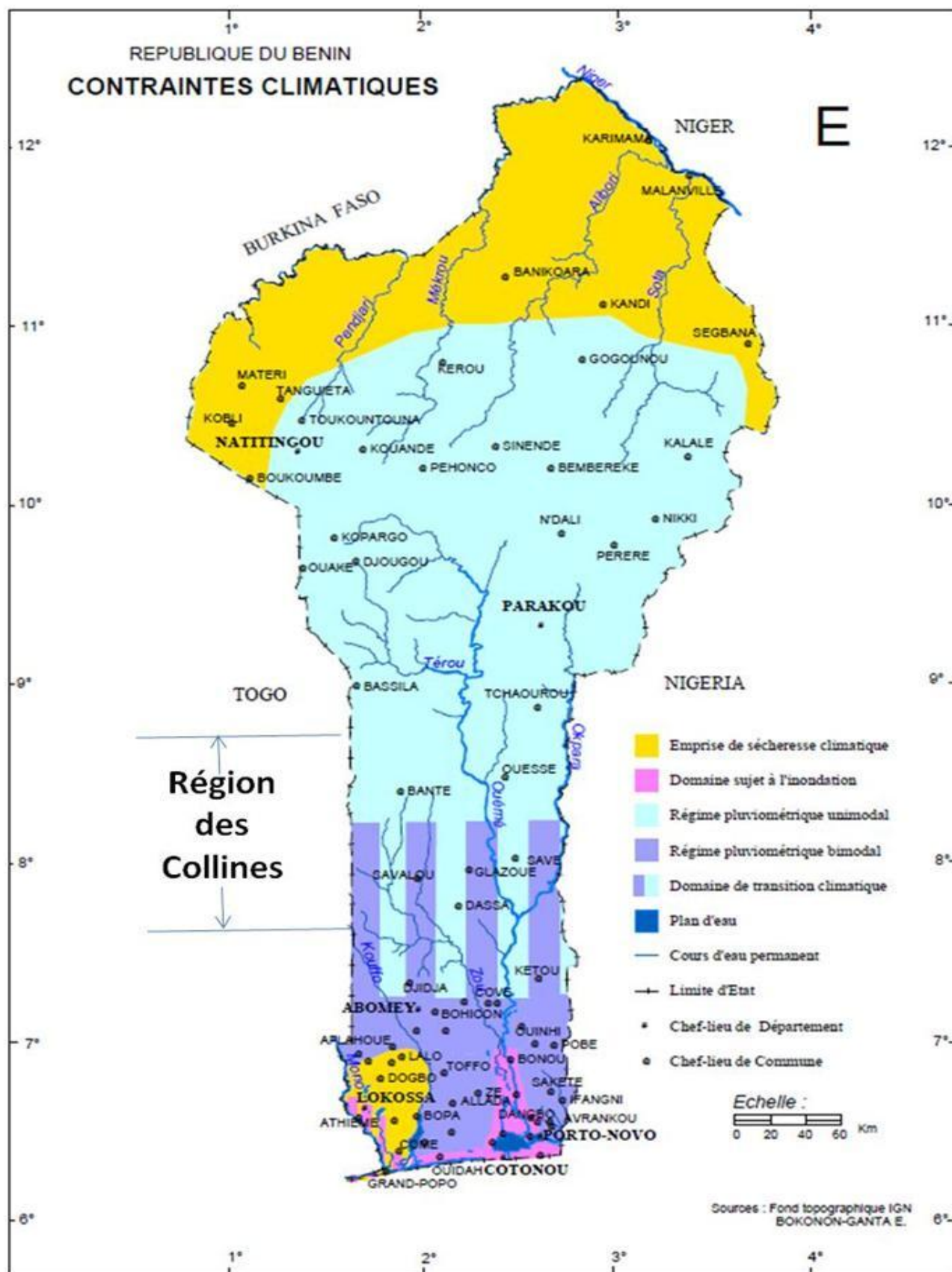


Figure 6 : Carte de contraintes climatiques de la zone d'étude

Sources : Fond topographique IGN, BOKONON-GANTA E.

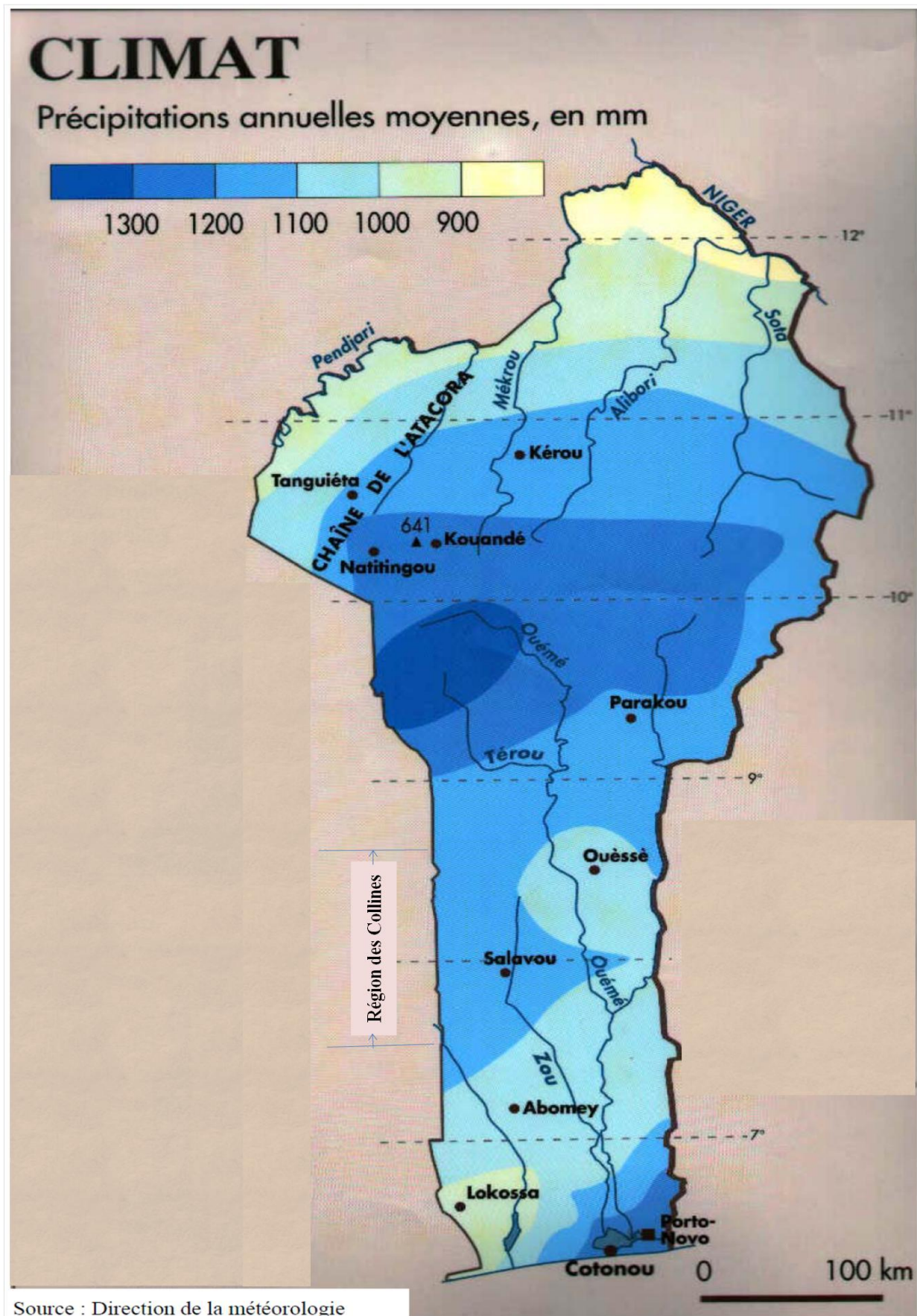


Figure 7 : Climats et pluviogrammes types du Bénin

Le paysage est une pénéplaine ondulée avec des collines d'altitude moyenne 300 m sur du matériel précambrien constitué de roches grenues plus ou moins métamorphisées : granite, granito-gneiss, gneiss et gneiss oillé: (Dubroeuq, 1977 cité par Agossou et Igué, 2002). La région hydrographique comporte de petites vallées à fond plat. La végétation varie de la savane claire très ouverte au Sud vers la savane boisée, voire la forêt claire au Nord-Ouest (Figure 8)

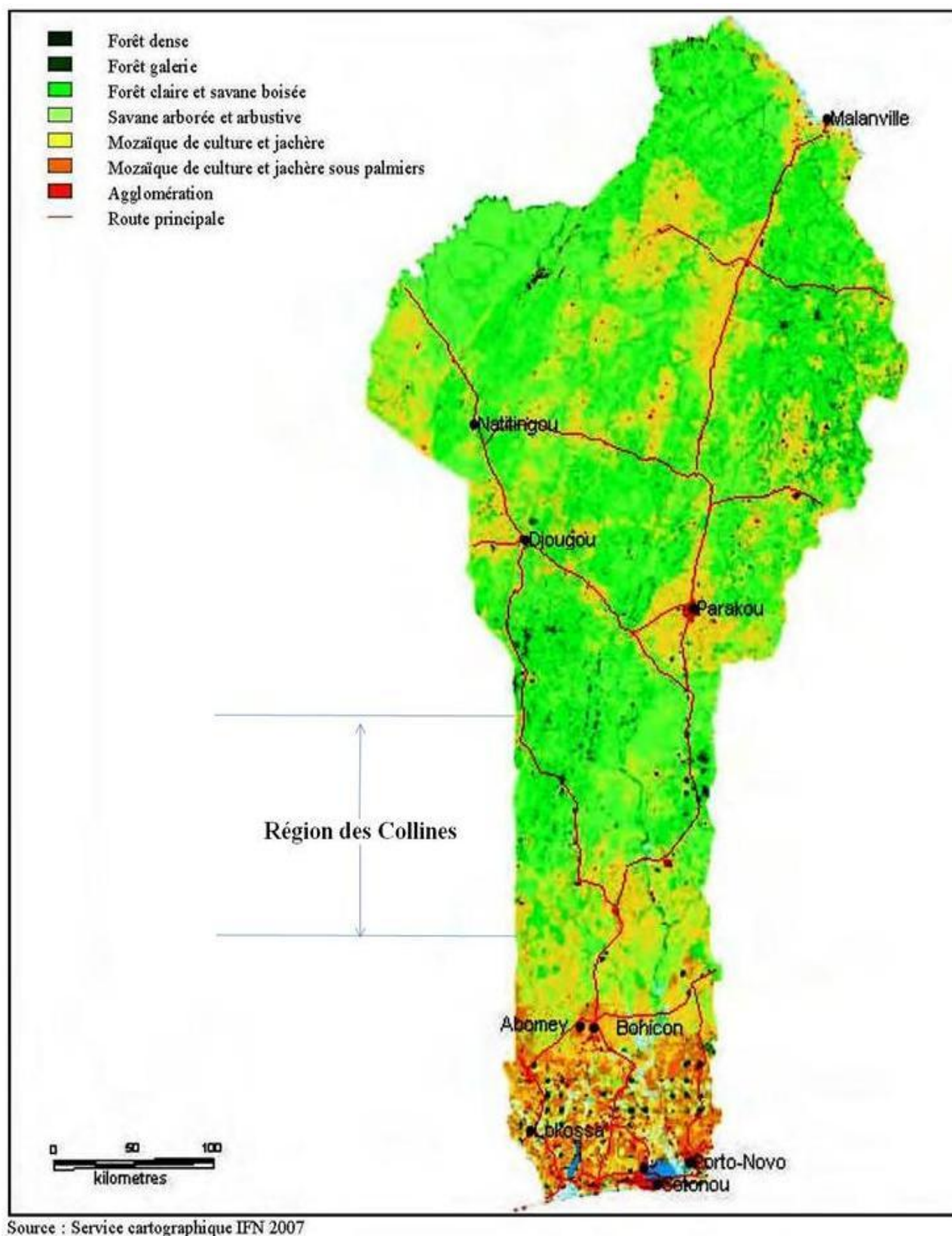


Figure 8 : Formations forestières et terroirs agricoles du Bénin (source : Service cartographique IFN 2007)

La savane arborée domine dans l'ensemble. Le maïs, l'arachide, le manioc, l'igname constituent les principales cultures vivrières. Le coton, le soja et l'anacarde constituent les principales cultures de rente.

Les assolements pratiqués dans la région centre du Bénin incluent essentiellement le maïs, le sorgho, le manioc, le soja et l'igname. Les cultures telles que le riz, le niébé, l'arachide et égusi sont plus marginales mais en progression (von Mulindabigwi, 2005). Le maraîchage peu important en termes de surface progresse près des grands axes. Le coton tend à disparaître (Figure 9).

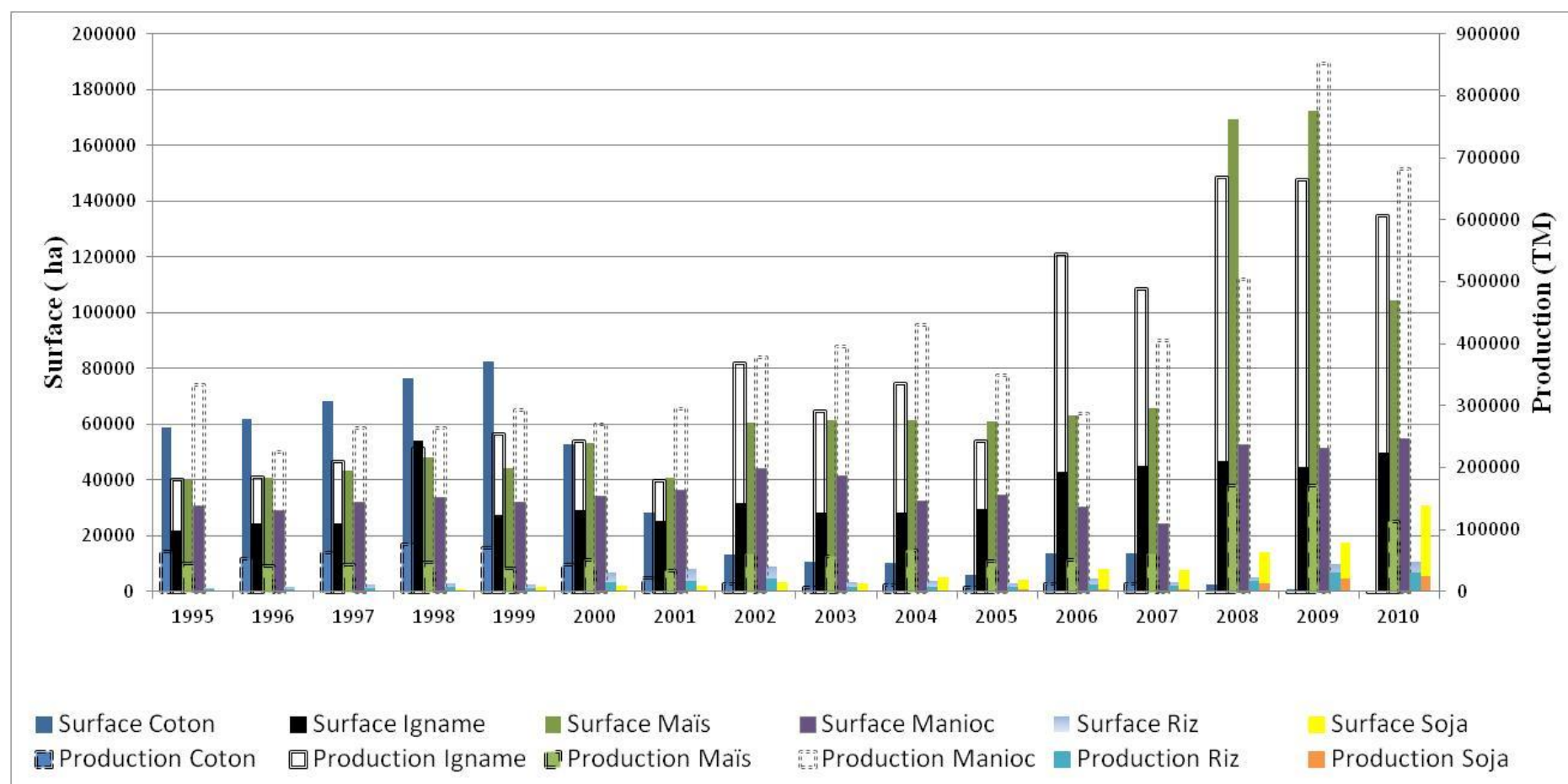


Figure 9: Evolution des superficies et de la production de quelques cultures dans les Collines au Centre du Bénin (1995-2010)

Source : MAEP, 2011

Les sols sont principalement de type ferrugineux tropical. Les unités pédologiques différenciées au niveau de la zone d'étude au Centre du Bénin se présentent comme suit (Agossou et Igué, 2002) :

- Sols peu profonds sur roche subaffleurante ou leptosols paralithiques dans la base de référence mondiale de sol (BRMS). Ils sont assez répandus à Ouessè en petites surfaces. Les sols comportent beaucoup de pierres et cailloux et peu de terre fine. Ils sont impropres à l'agriculture.
- Sols rouges très concrétionnés souvent indurés à faible profondeur ou plinthosols (ou lixisols ferriques) de la BRMS. Ils sont également dominants à Ouessè. Ils sont relativement fertiles mais difficiles à travailler à sec.
- Sols brun jaunâtres à concrétions ou luvisols ferriques selon la BRMS. Ces sols sont assez présents par exemple à Gomè (Glazoué) et à Miniffi (Dassa). Ils conviennent à toutes les cultures annuelles et pérennes.
- Les sols graveleux ou régosols dans la BRMS. Ce sont des sols ferrugineux tropicaux appauvris, à concrétions. Ils sont relativement riches en nutriments quoique possédant une faible capacité de rétention en eau.
- Les sols rouges limono-sableux peu concrétionnés ou ferralsols dans la BRMS. Ces sols sont profonds et on les note par exemple à Gomè (Glazoué) et à Miniffi (Dassa). Ils conviennent à toutes les cultures annuelles et pérennes.
- Les sols sableux ou arenosols dans la BRMS. Se rencontrent sur tous les sites dans certaines positions basses et replats de versant. Ils sont exploités comme carrières de sable continental. Ils sont cultivés en légumineuses à graines. Ils portent des plantations de teck ou d'anacardiens. Ils sont reconnus comme marginalement aptes à l'agriculture à cause de leur faible productivité.
- Les sols brun grisâtre des axes de drainage. Ils sont généralement argileux avec des taches d'hydromorphie. Ils sont relativement fertiles de par leur texture moyenne à fine et la position topographique favorable à la concentration des eaux d'écoulement.

Les situations agraires sont très diversifiées, allant de l'igname sédentarisée en jardin de case à l'igname de front pionnier où les migrants d'origines diverses développent des stratégies d'appropriation de terres à défricher pour l'igname (Floquet *et al.*, 2012). Les ressources naturelles existantes (sols, végétation, eaux, faune) sont menacées de destruction progressive du fait des mouvements migratoires saisonniers ou permanents des producteurs en quête de terres fertiles pour l'igname et des exploitants forestiers (Figure 10).

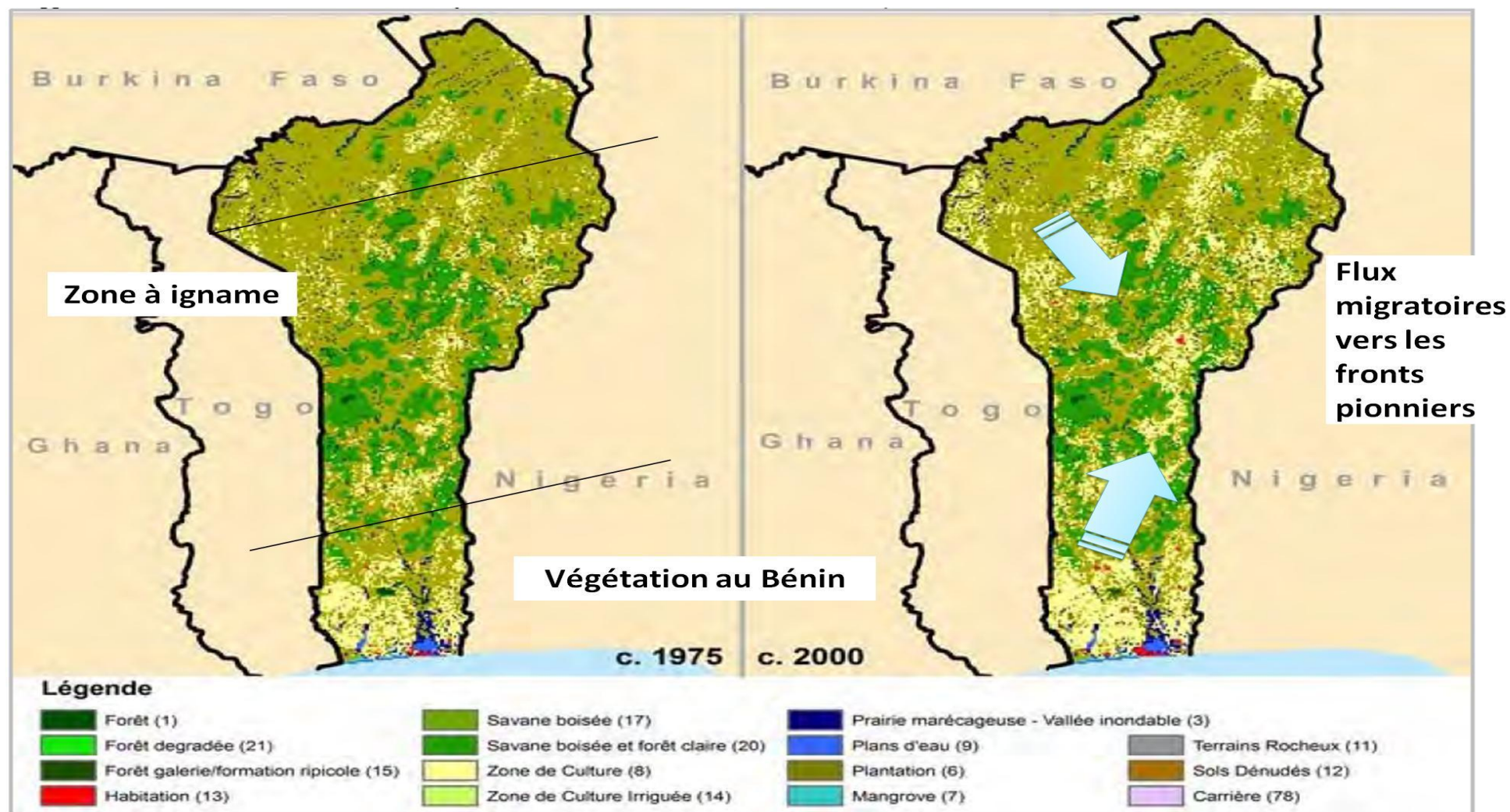


Figure 10 : Carte adaptée de l'occupation des sols au Bénin indiquant la végétation, la zone à igname et les flux migratoires vers les fronts pionniers

Source : Centre National de Télédétection (CENATEL)

Toutefois, il est à noter un effort de préservation de certaines espèces végétales lors des défrichements. Les raisons de cette pratique sont notamment d'ordre socio-économique (source de produits alimentaires, de produits médicinaux, de revenus monétaires, d'approvisionnement en bois d'énergie domestique et la menuiserie). Les espèces végétales naturelles telles que le néré (*Parkia biglobosa*) et le karité (*Vittelaria paradoxa*) offrent les matières premières qui entrent respectivement dans la fabrication de la moutarde et du beurre de karité. Le rônier (*Borassus aethiopum*) est exclusivement préservé où l'hypocotyle fraîche des jeunes plantules est consommée bouillie. L'anacardier (*Anacardium occidentale*) planté pour la remise en jachère des terres est entretenu pour son importance alimentaire et économique. Il est érigé en culture pérenne de rente et en «caisse de retraite». Il en est de même pour le teck (*Tectona grandis*) utilisé comme bois d'œuvre.

Une étude diagnostique conduite dans le cadre du projet CORUS par une équipe pluridisciplinaire dans les différentes communes de la région centre du Bénin a révélé trois zones de production d'igname selon l'importance du front pionnier (inexistant, en cours de saturation, abondant) abritant chacune des gros, moyens et petits producteurs (Floquet *et al.*, 2012). Les gros producteurs type 1 représentent 5 à 30% des effectifs et emblavent plus de 3 ha d'igname par ménage agricole sur front pionnier. Les producteurs moyens de type 2 (20 à 55% des effectifs) emblavent 0,5 à 3 ha et les petits producteurs type 3 (30 à 65% des effectifs) font moins de 0,5 ha. Les type 1 sont à la conquête des zones boisées encore à défricher où l'igname est cultivée une seule fois en tête de rotation. En situation de recul du front pionnier, certains de type 1 migrent vers de nouvelles terres, adaptées à leurs variétés exigeantes en fertilité, mais souvent en situation d'enclavement avec accès difficile aux marchés. D'autres (producteurs moyen de type 2), en manque de terres propices, installent l'igname dans des rotations plus longues, derrière des jachères dégradées, dans des plantations d'anacardiers et de manguiers, et surtout descendent vers les bas-fonds, mais souvent au prix d'une réduction de la place de l'igname dans leur assolement. Ainsi, un type 1 peut devenir un type 2 voire type 3 par manque de terres adaptées pour l'igname. Un agriculteur type 2 peut évoluer vers un type 1 par migration vers les fronts pionniers. En situation de manque de fronts pionniers et de bas-fonds marquée par l'épuisement des sols, les petits producteurs de types 3 pratiquent les systèmes de culture continue (igname sur igname, maïs-igname maïs-sorgho-igname, coton-maïs-igname...) avec risque de marginalisation de l'igname au profit d'autres activités (élevage des petits ruminants ou porcin), d'autant qu'une partie des terres proches du village sont sous anacarderaies. Tandis qu'avec l'âge les producteurs de type 1 peuvent évoluer vers le type 2 voire 3, certains producteurs plus jeunes peuvent choisir de

migrer vers des zones forestières, soit sur le terroir du village, soit sur le front pionnier hors de leur village d'origine. Notons que les jeunes adultes de type 1 ou fils de type 1 ont de meilleures chances de mobiliser les ressources nécessaires à cette migration mais que néanmoins, la migration permet de « redistribuer les cartes » puisqu'elles ouvrent des possibilités d'accéder au foncier et d'accumuler le capital initial en travaillant pour les premiers arrivants. L'étude révèle également que les itinéraires techniques des systèmes de culture à ignames dépendent de la variété d'igname, de l'aptitude culturale des sols et des conditions pédo-climatiques, de l'origine ethnique du producteur et de ses capacités à mettre en valeur les terres avec les ignames à deux récoltes et à les entretenir, et surtout de ses objectifs de production (production de semenceaux, autoconsommation, commercialisation...).

Aperçu sur les concepts

Zone soudano-guinéenne

La zone soudano-guinéenne où cette étude a été conduite correspond à la région médiane du Bénin allant de la latitude 7° Nord jusqu'à la latitude de 9° Nord. Elle couvre le Département des Collines au Centre du Bénin.

Le changement climatique

Le changement climatique résulte de l'augmentation des températures mondiales due aux émissions dans l'atmosphère des gaz à effet de serre (dioxyde de carbone,...). Au cours de ces dernières décennies, d'énormes quantités de dioxyde de carbone ont été déversées dans l'atmosphère du simple fait de brûler de la matière organique et des énergies fossiles. La quantité et la répartition des précipitations étant indirectement contrôlées par la température, plus la température s'élève, plus les eaux retenues dans l'atmosphère sont importantes. Ainsi, l'eau disponible pour la croissance des plantes diminue au fur et à mesure que la température augmente, ceci parce que l'humidité relative de l'air diminue (Sinsin et Kampmann, 2010).

La fertilité des sols

La fertilité d'un sol peut être définie comme l'ensemble des caractéristiques physico-chimiques (structure du sol, matière organique, éléments minéraux) et biologiques d'un sol (organismes vivants) qui interagissent dans le temps et dans l'espace selon les conditions pédoclimatiques et de gestion. La gestion de la fertilité du sol est une partie intégrale de la gestion des systèmes de cultures avec ses caractéristiques spatiales et temporelles particulières. La fertilité est habituellement vue en tant qu'équivalent de la capacité du sol à fournir des éléments nutritifs aux plantes. Selon Lamboni (2003), la fertilité en un sens plus étroit a trait aux aspects nutritifs du sol, et plus souvent seulement des macroéléments, habituellement l'azote et phosphore et parfois le potassium. Wopereis et Maatman (2002) parlent eux plutôt du capital d'éléments nutritifs qui se définit comme les stocks d'azote, de phosphore et d'autres éléments essentiels au sol qui deviennent disponibles aux plantes pendant une période de 5 à 10 ans.

Système de culture

Le système de culture équivaut à la répartition des cultures dans l'espace et dans le temps (Sébillotte, 1978).

Itinéraire technique

Un itinéraire technique est défini comme la succession logique et ordonnée de techniques appliquées à une culture donnée dans le but de satisfaire les objectifs de production (Sébillotte, 1978). Autrement dit, c'est l'ensemble des techniques combinées pour conduire une culture, y compris le choix du sol, des variétés, des densités, etc. en vue d'atteindre des objectifs divers, accompagné des raisons qui justifient ces choix. Il s'agit d'une conduite cohérente de la culture, tout au long de son cycle de végétation, dans un milieu naturel et social donné. Ceci signifie, en particulier que :

- toutes les opérations sont interdépendantes,
- les opérations sont décidées par un agriculteur. Celui-ci effectue des choix selon des critères et des contraintes techniques, économiques et sociales. *«La pratique d'un itinéraire technique correspond à la mobilisation de moyens (matériels, intrants), à la fourniture de travail humain (manuel, intellectuel) et à la poursuite d'un objectif de production donné (qualité et quantité)».*

Les itinéraires techniques pratiqués par les agriculteurs dépendent non seulement de leurs objectifs de production mais aussi de leurs connaissances techniques, qui influent sur la répartition de leurs moyens de production entre les différentes activités de l'exploitation. Les itinéraires techniques sont ainsi indissociables de l'exploitation agricole.

Système itinérant de défriche sur brûlis

La culture d'igname, à cause de son exigence en terre fertile, est pratiquée sur les terres boisées nouvellement défrichées où elle intervient en tête de rotation. L'igname est cultivée une ou au plus deux fois dans les successions culturales du même champ. Cette pratique amène les producteurs à se déplacer pour défricher de nouvelles terres entraînant ainsi une agriculture itinérante sur brûlis qui constitue l'une des principales causes de déforestation dans la région des savanes du Bénin.

Le système traditionnel "(Gbégbigbo" en Fon ou "Igbè bubu" en Yoruba) est la pratique de défriche forestière sur brûlis pour la production d'igname entraînant la déforestation et la dégradation des sols. Elle est de moins en moins pratiquée par manque de terres propices pour l'igname. Pour contourner cette difficulté, les agriculteurs ont recours aux jachères dégradées. Ainsi, les systèmes "Adjiba" (en Yoruba) et "Gbehiho" (en Fon) intégrant l'incinération des arbustes ou arbres sont pratiqués dans la zone d'étude. La pratique "Adjiba" consiste au défrichage à la houe à un stade de développement avancé des graminées sauvages avant la confection des buttes et celle de "Gbehiho" consiste au défrichage à la machette des graminées sauvages suivi de la confection des buttes. Le système "Gbégbigbo" (en Fon) est la délimitation avant la saison sèche d'une friche par des pare-feux suivis du labour après brûlis progressif de la végétation sur la parcelle délimitée (Maliki, 2006).

Sédentarisation/Système de culture sédentarisé

Par opposition au système d'agriculture itinérante de défriche sur brûlis, la sédentarisation de la culture de l'igname est l'ensemble des pratiques (itinéraires techniques) permettant aux producteurs de rester toujours sur les mêmes parcelles en combinant plusieurs modes d'organisation de la production (assolement, rotation, association...) pour obtenir de meilleurs rendements.

Les résultats des travaux de Maliki (2006) ont révélé des pratiques traditionnelles de sédentarisation de la culture de l'igname dans les jachères de courte durée à graminée ("Fan") et dans les systèmes de culture continue à maïs ou maïs/sorgho ("Ekpoyiyo"). Le "Fan" en Fon est pratiqué à partir d'une friche au stade de jeunes graminées suivie de la confection de buttes avec enfouissement des graminées. Il est procédé à la mise en place ou non d'une culture vivrière intercalaire avant la période de plantation de l'igname précédée d'un rebutage. "EKpoyiyo" (en Yoruba) est la rotation igname après céréales (maïs/sorgho). "Okodjidji" (en Yoruba) est la reconversion de billons de cultures annuelles en buttes pour l'igname. "Tédosunsun" (en Fon) est la pratique de rotation igname sur igname sans autres cultures annuelles intercalaires. Il existe d'autres systèmes de culture sédentarisés d'igname non moins importants: igname dans les bas-fonds, igname après parcage des bœufs, igname dans les anacarderaies à densité moyenne de 100 arbres/ha...

La Recherche-Développement au Centre du Bénin a mis au point avec les producteurs de la région des Collines, des systèmes sédentarisés à base d'igname intégrant les légumineuses

(*Aeschynomene histrix*, *Mucuna pruriens* var *utilis*, *Stylosanthes guianensis*, *Gliricidia sepium*...).

Les engrais organiques d'origine végétale

On entend par engrais organique d'origine végétale la culture d'une plante ou toute matière organique végétale utilisée dans le but de l'amélioration de la fertilité des sols ou comme engrais organique pour la culture principale. Selon le mode d'apport (enfouissement ou mulch), la minéralisation de la matière organique végétale fournit au sol les éléments nutritifs à savoir : azote, phosphore, potassium, magnésium, calcium, soufre et certains oligo-éléments en particulier le zinc et le manganèse. Généralement, les études ont révélé que l'incorporation de la matière organique végétale fournit plus d'azote que le mulching (paillage) à la culture subséquente en raison de la décomposition plus rapide de la matière organique après l'incorporation (Hulugalle *et al.* 1985; Franzen *et al.* 1994; Ibewiro *et al.* 2000).

Jachère naturelle

La jachère naturelle représente l'état post-cultural, phase passive de restauration d'un écosystème, dont l'état final procure en principe des conditions renouvelées pour la culture suivante, en particulier un milieu assaini et des éléments nutritifs plus abondants, plus disponibles et plus accessibles aux racines (Floret and Pontanier, 2001). La jachère réanime les fonctions de fertilité de l'écosystème perturbé, en réinjectant des matières organiques mortes ou vivantes (exsudations, racines à fort taux de renouvellement, racines pérennes), en diversifiant la biologie du sol, en immobilisant des sels minéraux dans la biomasse à titre conservatoire. Selon Mulindabigwi (2005), on distingue les jachères saisonnières (6-12 mois), les jachères de courte durée (1-2 ans), les jachères de moyenne durée (3-6 ans) et les jachères de longue durée (7 ans et plus). Par exemple, *Andropogon gayanus* est une graminée rencontrée dans les jachères de courte durée au Centre Bénin comme précédent pour l'igname dans les systèmes de cultures sédentarisés. Les peuplements de *Andropogon* produisent une phytomasse maximale de trois tonnes de matière sèche par hectare environ (racines incluses), en sol ferralitiques sableux (Serpantié *et al.*, 1999) et quatre tonnes de matière sèche par hectare et par an en sols ferrugineux sableux (Fournier, 1994)

Dans une forêt secondaire de 40 ans sous climat guinéen, les racines représentent 25 tonnes par hectare de matière sèche de racines, contenant 214 kg d'azote, 26 kg de P₂O₅ et 105 kg de K₂O, 204 kg de CaO; les 336 tonnes de parties aériennes contiennent respectivement 1831, 287, 983, 3537 kg des éléments précités. Une jachère à *Andropogon* en savane soudanienne de 20 ans mobilise en revanche seulement respectivement 13, 8, 13, 3 kg des éléments précités dans 4 tonnes de matière sèche par ha de racines des graminées. Pour les parties aériennes des herbacées 9 tonnes de biomasse contiennent 27, 18, 55, et 49 kg d'éléments; les arbres de cette savane donnent quant à eux 54 t ha⁻¹ de partie aériennes soient 54, 100, 33, 175 kg d'éléments (Nye et Greenland, 1964). En comparaison, une culture de maïs en zone soudanienne représente 7 tonnes de matière sèche mobilisant 102, 14, 105, 13 kg d'éléments (N; P₂O₅, K₂O et CaO) (Piéri, 1989). La mobilisation minérale a pour origine des processus contrastés entre groupes fonctionnels : la fixation non symbiotique et l'assistance à l'absorption d'éléments peu assimilables par les mycorhizes (Chotte *et al.*, 2001), la fixation symbiotique et la nutrition des différentes plantes des jachères à partir des formes minérales assimilables et mobilisables présentes dans le sol ou apportées en cours de jachère. Cette mobilisation dépend de la situation pédoclimatique, de l'état initial, de la durée et de l'écologie de la jachère. Elle est aussi plus importante pour les ligneux que pour les herbacées.

Le feu de végétation est une méthode de gestion des jachères naturelles. On distingue deux types de feux, selon l'époque où ils ont lieu: les feux de végétation en début de saison sèche (feux précoces), et les feux tardifs. Les feux tardifs causent les perturbations les plus sévères. Ils provoquent la disparition des grands arbres et la mort prématurée de nombreux autres arbres. Les feux, et surtout les feux tardifs, causent la mise à nu des terres et augmente la vulnérabilité du sol. Ils facilitent l'érosion par l'action directe des gouttes de pluie et par l'écoulement des eaux. Les feux provoquent aussi la volatilisation de la matière organique et de l'azote, empêchent l'accumulation de la matière organique dans le sol, et empêchent la restauration des sols sous jachères. Areola *et al.* (1982) ont rapporté la moindre efficacité des savanes par rapport à la forêt dans la remontée de la matière organique du sol en culture itinérante qui s'expliquait principalement par les prélèvements de matière organique dus aux feux de saison sèche. Au Cameroun, sur vertisols, Pontanier & Roussel (1998) montrent que le feu joue un effet dépressif sur tous les groupes de faune épigés. Seuls les vers de terre, réfugiés vers vingt-cinq centimètres, ne sont pas sensibles à ce facteur. Un essai sur les effets de précocité du feu a aussi été mis en place au Mali, sur deux types de sols, et avec ou sans protection (Masse *et al.*, 1998); de celui-ci, il apparaît que le feu n'a pas d'action significative sur les paramètres chimiques du sol. Le feu modifie en revanche l'état de surface, réduit la

porosité et accroît ruissellement et érosion (Masse *et al.*, 1998; Fournier *et al.*, 2000). Le feu joue aussi un rôle très important dans la disparition des adventices. Ces essais suggèrent qu'en savane, la biomasse de la litière pauvre en azote, et souvent brûlée, n'intervient pas dans l'accumulation organique. L'effet du feu est donc indirect: en empêchant le retour des ligneux, il empêche le retour de fonctions particulièrement favorables à la recharge organique.

Les jachères améliorées à base des légumineuses

Les jachères améliorées sont cultivées et peuvent être de courte durée avec des légumineuses herbacées ou de longue durée avec des légumineuses arbustives. Toutefois, toutes les jachères cultivées ne sont pas basées sur des légumineuses. Elles peuvent parfois être à base aussi des graminées ou des astéracées.

Les légumineuses sont les plantes ayant la capacité de fixer l'azote atmosphérique grâce à des bactéries (rhizobiums) dans des nodosités au niveau des racines. Au nombre des légumineuses utilisées par les producteurs/productrices dans les systèmes sédentarisés à base d'igname dans la région des Collines au Centre du Bénin, on peut citer : les herbacées (*Aeschynomene histrix*, *Mucuna pruriens* var *utilis*) et les arbustives (*Gliricidia sepium*). Les caractéristiques des légumineuses testées dans le cadre de cette étude sont ci-dessous mentionnées.

Aeschynomene histrix

Aeschynomene histrix, est une légumineuse herbacée appartenant à la famille des Fabacées. Cette légumineuse herbacée bisannuelle, à port érigé peut atteindre 1 à 2 m de hauteur en conditions favorables (pluviométrie supérieure à 900 mm d'eau). Elle est adaptée à une large gamme de sols et de climats. Elle supporte des conditions de sols défavorables sur des sols sableux, pauvres, acides, parfois drainés. L'installation par semis ne présente pas de difficulté particulière. Cependant les graines sont de petites tailles ce qui nécessite de préparer un lit de semis soigné.

La levée est rapide (une à deux semaines) et le taux de germination est généralement élevé. *Aeschynomene histrix* produit 2 à 6 tonnes de matière sèche de feuilles par hectare et par an (Photos 4-6).



Photo 4 : Une jachère de *Aeschynomene histrix*



Photo 5 : Récolte des graines de *Aeschynomene histrix* au champ



Photo 6 : Vanage des graines de *Aeschynomene histrix* au champ

Elle permet d'obtenir une quantité importante de fourrage de bonne qualité pour l'alimentation des animaux surtout en saison sèche, d'améliorer la fertilité du sol à court terme, d'assurer une meilleure couverture du sol et d'atténuer en conséquence l'enherbement et l'érosion du sol. L'engrais vert présente un taux de décomposition accéléré. L'introduction d'*Aeschynomene* dans les systèmes d'alimentation des animaux se justifie par l'apport protéique qu'elle permet, grâce à sa teneur en azote nettement supérieure à celle des graminées tropicales. La durée du cycle végétatif jusqu'à la floraison de *Aeschynomene* varie de 200 à 306 jours après semis. La production de semences peut atteindre 260 kg ha⁻¹ ou plus. La production de graines en deuxième année est plus élevée qu'en première année (Maliki *et al.*, 2007a).

Mucuna pruriens* var *utilis

Mucuna pruriens var *utilis* est une plante de couverture volubile à larges feuilles appartenant à la famille des Fabacées. Comme toute plante de couverture, le *Mucuna* limite les risques d'érosion et de dessèchement du sol, réduit le lessivage profond, enrichit le sol en humus après décomposition et permet de participer à la lutte contre les adventices notamment l'*Imperata cylindrica* et le *Striga hermontica*. En conditions adéquates, le *Mucuna* peut fixer l'azote atmosphérique par l'intermédiaire des rhizobiums associés. Il peut être utilisé dans un contexte d'amélioration de la jachère. Son utilisation comme plante de couverture permet d'améliorer de manière très sensible les rendements en maïs (Versteeg, 1990; Assogba, 1996; Etèka, 1997; Azontondé *et al.*, 1998). Les conditions optimales de la fixation azotée par le *Mucuna* sont mal connues (Photo 7).



Photo 7 : Une jachère de *Mucuna pruriens* var *utilis*

On sait notamment qu'une fertilisation excessive en N peut inhiber cette fixation, qui dépend par ailleurs du niveau de P du sol. Le *Mucuna* peut produire de 7 à 10 t de matière sèche ha⁻¹ par an (Azontondé, 1993 ; Carsky *et al.*, 1998). On estime que cette biomasse de *Mucuna* contient 350 kg de N, 70 kg de P, 156 kg de K, 36 kg de Ca et 60 kg de Mg (Assogba, 1996). Les restitutions au sol toujours par hectare, peuvent être de 5320 kg de C, 290 kg de N, 100 kg de P, 240 kg de K, 40 kg de Ca et 100 kg de Mg (Azontondé *et al.*, 1998). Le *Mucuna* produit 200-600 kg ha⁻¹ de graines (Barrot, 1996 ; Maliki *et al.*, 2007b). Les graines sont riches en acides aminés essentiels et peuvent être utilisées pour l'alimentation animale et humaine. Les variétés existantes, pourtant riches en protéine (26%) ne se mangent pas aisément. Elles contiennent une substance toxique, la L-dopa qui impose un traitement technique avant utilisation alimentaire (Versteeg, 1990 ; Etéka, 1997 ; Dossa, 1998 ; Lorenzetti *et al.*, 1998). L'IITA en 1980 a découvert qu'au Ghana, les paysans utilisent traditionnellement ces graines pour l'alimentation humaine. Des pratiques traditionnelles existent également au Nigeria. Les populations du Mozambique disposent de procédés de cuisson pour éliminer la matière toxique du *Mucuna*. Au Brésil, les femmes grillent les grains pour obtenir un produit analogue au café. Le *Mucuna* peut aussi être brouté par les animaux et utilisé en farine associée à de la farine de maïs. Dossa (1998) a montré que la farine de *Mucuna* peut être utilisée à 12 ou 20% en substitution à la farine de soja ou de matières protéiques pour les animaux.

Gliricidia sepium

Une légumineuse arbustive est une essence ligneuse pérenne. Elle peut être utilisée pour des objectifs multiples de production (engrais organique, bois, fourrage, fruits, etc.) et de

service (brise-vent, ombrage, tuteurage, lutte contre l'érosion, etc.) (Kang et Reynolds, 1986). *Gliricidia sepium* est une légumineuse arbustive appartenant à la famille des Papilionacées (Photo 8).



Photo 8 : Une jachère de *Gliricidia sepium* à Dassa au Centre du Bénin

L'arbuste se multiplie par semis direct des graines, par bouture ou plants en pot. La hauteur de l'arbuste peut atteindre 15 m. Il présente une bonne reprise après la coupe. Il assure une décomposition modérée des feuilles et une libération progressive des éléments nutritifs dans le sol. Il est souvent installé en clôture et utilisé également comme fourrage pour les animaux (Maliki *et al.*, 2005; Maliki, 2006).

L'igname

L'igname appartient à l'ordre des Dioscoréales, à la famille des Dioscoréacées et au genre *Dioscorea*. Ce genre est composé de plusieurs espèces, chacune comportant plusieurs variétés. Bien que classées parmi les monocotylédones (Chadefaud et Emberger, 1960), les espèces du genre *Dioscorea* présentent une situation intermédiaire entre mono et dicotylédones (Degras *et al.*, 1977; Miège, 1952). L'igname est une plante cosmopolite dont l'origine géographique varie en fonction des espèces. On trouve ainsi des espèces originaires de l'Amérique Tropicale (*D. bulbifera*, *D. dumetorum*), de l'Afrique de l'Ouest (*D. cayenensis-rotundata*), de l'Asie du Sud-Est (*D. alata*, *D. esculenta*, *D. opposita*). Selon Wilson (1977), l'igname diffère des autres plantes à racines et à tubercules par cette grande variabilité des origines qui entraîne également une diversité génétique. Cinq espèces sont cultivées au Bénin. Il s'agit de *Dioscorea alata*, *Dioscorea dumetorum*, *Dioscorea esculenta*,

Dioscorea bulbifera et de l'hybride interspécifique *Dioscorea cayenensis-rotundata* qui représente en fait un complexe botanique (Dansi *et al.*, 2003). *Dioscorea cayenensis-rotundata* est, parmi les espèces ci-dessus citées, la plus répandue, la plus cultivée (90% de la production totale nationale) et la plus importante économiquement. Sa diversité variétale et génétique révélée par les caractérisations morphologiques, moléculaires et cytogénétiques est très grande. Il existe environ 600 clones de cette espèce hybride que l'on regroupe selon le cycle de maturation en variété précoce (Ishukô en Nago) à deux récoltes et variété tardive (Kokoro en Fon et Nago) à une récolte.

L'igname est une plante grimpante dont la partie aérienne est composée de la tige qui est une liane de forme cylindrique ou angulaire suivant les espèces et sur laquelle sont formées les inflorescences et les feuilles (Photo 9).



Photo 9 : Tuteurage d'un plant d'igname Florido (*Dioscorea alata*) dans la région des Collines au Centre Bénin

Les feuilles sont généralement simples mais parfois composées (tri ou pentafoliées). La partie souterraine est constituée de deux structures distinctes : les racines et les tubercules. Les variétés précoces ou à deux récoltes fournissent successivement des produits distincts à l'intérieur de leur cycle végétatif annuel. De juin à octobre, on obtient des tubercules consommables mais peu conservables parce que n'ayant pas atteint la maturité physiologique (établissement de la dormance); au terme de la période végétative (décembre), une seconde production de tubercules fournit la semence. Les variétés à récolte unique (variétés tardives) sont exploitées en fin de cycle végétatif. Les tubercules parvenus à maturité physiologique peuvent être conservés pendant cinq mois sans altération importante de la qualité culinaire.

La minéralisation de la matière organique végétale

La matière organique végétale se décompose sous l'action des micro-organismes. Les insectes, les acariens, les crustacés, les myriapodes et les termites facilitent l'humification en divisant les résidus végétaux (ciseaux biologiques) (Hermant, 1977). Les nématodes, les annélides et les arthropodes participent à la transformation de la matière organique en réduisant la dimension des constituants organiques (Hermant, 1977). Les bactéries, les algues et les protozoaires interviennent directement dans le processus de l'humification (Domerques et Mangnenot, 1970). Ce processus passe par deux étapes : i) la décomposition ou la désagrégation des constituants où les micro-organismes s'attaquent aux molécules plus résistantes des parois cellulaires (désagrégation des polysaccharides dont notamment la cellulose, les hémicelluloses, les lignines, les tanins, les mucilages et les gommages; ii) ensuite, les réactions propres à l'humification qui concernent une chaîne d'interactions chimiques ou biochimiques (réaction de polymérisation et de polycondensation) qui conduisent à la fabrication des macromolécules organiques plus stables (acides humiques) qui seraient ensuite réorganisées, redégradées en acide fulvique ou en humine (Hermant, 1977).

Humus et humification

L'humus représente un stade avancé d'évolution de la matière organique dans le sol. C'est un groupe de substances de couleur brune à noire ayant un rapport C/N de l'ordre de 10 et offrant une grande résistance à la dégradation par les micro-organismes. L'ensemble de processus de transformation de la matière organique fraîche en humus est appelé humification (Duchaufour, 1977). L'humification subit l'influence des facteurs tels que le climat (température et humidité), les micro-organismes en fonction de la température (psychrophiles, mésophiles, et les thermophiles), le milieu minéral du sol (pH, oxyde de fer, calcaire, aluminium).

Recherche-Développement

Il s'agit d'une démarche scientifique qui s'exécute en trois étapes principalement : i) analyse et diagnostic du milieu rural, ii) expérimentation et mise au point des innovations

techniques et organisationnelles, iii) diffusion et appropriation par les producteurs de ces innovations. L'expérimentation est conduite en vraie grandeur et en concertation étroite avec les agriculteurs sur des améliorations techniques, économiques et sociales de leurs systèmes de production, et des modalités d'exploitation de leur milieu (Jouve et Mercoiret, 1987). Le terme anglais "Farming System Research and Development" est l'équivalent accepté de Recherche-Développement (R-D) (Pillot, 1987).

Recherche participative

Cette méthode de recherche suppose que la définition et l'étude d'une situation soient effectuées conjointement par les chercheurs et les acteurs concernés, afin de garantir l'implication de ces derniers dans la définition des problématiques de recherche et dans la mise en œuvre de solutions adéquates. Une des étapes essentielles de la gestion participative des ressources naturelles est de permettre cette prise de conscience de l'impact des différentes pratiques sur le milieu et de réfléchir avec les populations sur les possibilités de les améliorer.

Adaptation d'itinéraire technique

Il s'agit des ajustements apportés par les utilisateurs finaux des produits de la recherche sur un itinéraire technique par rapport à la pratique préconisée. Elle peut être liée aux contraintes d'ordre socio-économique de l'exploitant (main d'œuvre, capital, terre, équipements agricoles, liquidités, etc.) et biophysique (aléas climatiques, type de sol, qualité du sol, etc.).

Agriculture durable/durabilité des systèmes de culture/développement rural durable

Agriculture durable, 'agriculture soutenable', 'agriculture viable',... sont des termes utilisés pour traduire *sustainable agriculture*; terme anglais. Certains cherchent même à préciser de quelle 'viabilité' il s'agit: alors on parle d'agriculture économiquement ou écologiquement viable (Biaou, 1995).

Stiefel (1989) expliquait que le programme de lutte biologique est installé à l'IITA en vue de '*créer des systèmes agricoles durables, capables de remplacer la jachère forestière et l'agriculture itinérante sur brûlis pratiquées sous les tropiques humides et semi-humides, et en vue d'accroître la production des vivriers pratiqués sous ces systèmes*'. Pour Mensah

(1989), une condition sine qua non de tout développement viable de l'agriculture est l'amélioration de la fertilité de la terre, ou de son maintien si elle se trouve déjà à un niveau satisfaisant. *'L'agriculture soutenable se définit comme un système de production qui satisfait la demande des produits alimentaires et des fibres, dans un futur indéfini, et à des coûts économiques, sociaux, et environnementaux qui ne mettent pas en péril le niveau du bien-être des générations présentes et futures en terme de revenu par habitant'* (Cresson, 1991).

On peut dire que l'agriculture durable exige des générations actuelles d'avoir présent à l'esprit que, les ressources naturelles à leur disposition appartiennent autant à eux-mêmes, qu'à ceux qui sont morts et aux générations futures; paraphrasant un chef coutumier nigérian qui donnait une explication à la fois socio-économique, culturelle, et mystique du caractère d'inaliénabilité du patrimoine foncier dans un système coutumier (Elias, 1956). Elles n'ont donc pas le droit de faire un usage égocentrique de ces ressources (forêts, eaux, terres, environnement, etc.) que les générations passées leur ont léguées. Elles doivent les gérer adéquatement, afin de les léguer enrichies à leur tour aux générations futures. Quelles que soient les définitions retenues, l'agriculture durable vise avant tout, dans un horizon infini, la productivité et le bien-être des populations, tout en préservant les ressources productives au sens large, y compris l'environnement et l'homme lui-même dans toutes ses dimensions. Ainsi, une agriculture durable est une agriculture qui n'affaiblit pas sa propre base de ressources physiques (et qui n'est pas trop nettement inabordable ou perturbatrice sur le plan social, qui est suffisamment robuste, et qui ne menace pas la nature mais plutôt de la protéger). La fertilité du sol est la clé évidente d'une agriculture durable dans laquelle la végétation joue souvent un rôle d'intermédiaire entre les actions humaines et la fertilité du sol.

En passant en revue les nombreuses définitions qui ont été inventées pour saisir le concept de durabilité (par exemple: Pezzey, 1989; Pearce *et al.*, 1989), on s'aperçoit qu'une image simple est au centre de tout: Un exemple en est la relation entre la durabilité et l'évaluation économique des projets: d'un côté, il est juste que les analyses avantages-coûts appliquent un taux d'escompte pour exprimer la préférence humaine pour le présent plutôt que pour le futur, mais d'un autre côté, tout taux d'escompte aboutit à un poids économique des générations futures égal à zéro (De Groot, 1992).

Il est souvent possible de faire une évaluation intuitive en essayant d'imaginer les réactions potentielles des systèmes aux changements de prix, de climat, aux modifications démographiques, technologiques, etc. Il est possible alors que des types d'agriculture LEIA (*low external input agriculture*) s'avèrent préférables aux types HEIA (*high external input agriculture*),

Cependant, compte tenu des technologies et des activités humaines déployées à l'échelle planétaire, de graves menaces écologiques et sociales pèsent sur les générations futures, confrontées à une raréfaction inéluctable des ressources et de l'espace et à des modifications majeures des grands équilibres écologiques. On ne met plus en doute aujourd'hui la réalité de l'accroissement de la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre et les risques de modifications climatiques majeures, plus ou moins graves et plus ou moins imprévisibles qui en découleront. L'effort porte sur la recherche et le développement des techniques capables de réduire ou limiter le plus rapidement possible la consommation énergétique de l'humanité (Vilain, 2003). Le protocole de Kyoto et plusieurs accords internationaux ont précisément pour objectifs de prévenir ou réduire quelques grandes menaces planétaires. L'objectif de la conférence de Rio + 20 est d'accélérer la transition mondiale vers une économie verte. À Rio+20, l'énergie a été à l'ordre du jour, parce que la consommation de combustibles fossiles est l'un des moteurs du changement climatique. Les forêts sont un sujet de base de Rio + 20 et considérées comme puits de carbone et le paradis de la biodiversité (Dembowski, 2012).

Les risques de dégradation des terres et de l'environnement associés aux techniques intensives, mais aussi à certaines pratiques paysannes rendues extensives par manque d'accès aux facteurs de production, ont rendu nécessaire la recherche d'une *durabilité* des systèmes de culture. Cette notion concerne d'abord les conditions de reproduction du système, comme la stabilité des rendements et la viabilité économique. Elle s'attache aussi à minimiser les impacts sur l'environnement et les ressources, localement (échelon de la parcelle, du paysage, de la région) ou mondialement (Sholes *et al.*, 1994). La matière organique du sol, est un indicateur potentiel de la durabilité des systèmes de culture dans les zones tropicales semi-arides subhumides d'Afrique de l'Ouest (Feller, 1993).

Enfin, comme l'a indiqué Röling (1988), un développement rural durable doit reposer sur une action synergique entre la recherche, la vulgarisation et les paysans. Malgré les efforts le développement des liens demeurent jusqu'à là problématique.

Référentiel technico-économique

Un référentiel technico-économique (RTE) retrace un itinéraire technique dont les performances ont été évaluées et la mise en œuvre peut être recommandée. Le référentiel technico-économique sur la production durable d'igname de qualité dans un système de

culture avec le *Gliricidia sepium* et *Aeschynomene histrix* met en relief non seulement les aspects technico-économiques de la technologie mais également écologiques (Maliki *et al.*, 2005).

La deuxième partie du document met en exergue les systèmes à base des légumineuses herbacées promus par la recherche. Le chapitre 2.1 de cette partie porte sur les performances agronomiques des systèmes (évaluation de la biomasse aérienne recyclée des précédents culturaux, exportation, recyclage des éléments minéraux et bilan net d'azote des précédents culturaux).

**Systèmes promus par la recherche intégrant les
légumineuses herbacées (essais conduits de 2002 à 2005)**

Evaluating yam-based cropping systems using herbaceous legumes in the savannah transitional agro-ecological zone of Benin

R. Maliki, B. Sinsin, A. Floquet

Journal of Sustainable Agriculture (36:1–21, 2012, DOI: 10.1080/10440046.2011.646352)

Chapitre 2.1.

Evaluating yam-based cropping systems using herbaceous legumes in the savannah transitional agro-ecological zone of Benin

Abstract

Traditional yam cropping systems are based on shifting cultivation and slash and burn, which lead to deforestation and soil degradation. The objective of this study was to determine the productivity of cropping sequences with herbaceous legumes (legumes dry matter production, legumes nutrients recycled or removed, N₂-fixed and N net balance) and their effects on the profitability of yam. We compared smallholders' traditional cropping sequences (1-year fallow of *Andropogonon gayanus*, maize) with those using herbaceous legumes (maize-*Aeschynomene histrix*, maize-*Mucuna pruriens* var *utilis*) during the 2002-2005 cropping seasons. Highest dry mater, nutrients recycled and net nitrogen contribution were found with *Mucuna* preceding yam ($P < 0.001$). Highest net income and return on investment were achieved in yam-based system with legumes

Keywords: *Dioscorea cayenensis-rotundata*; Cropping sequences; Nitrogen; Herbaceous legumes; Return on investment

Introduction

One of the most serious problems of farming system is the excessive reductions of agricultural productivity resulting from major degradation of soil fertility. In 1990 Edouard Saouma wrote that the most serious problem of African countries in the future can be that of land degradation (FAO, 1990). To understand how and why lands become degraded, one needs some knowledge of the physical environment, population, cultivation history and farming systems (Azontondé, 1993; Igué, 2000).

Current yam-based cropping systems, which involve shifting cultivation, slash-and-burn or short fallow, often result in deforestation and soil nutrient depletion (Cornet *et al.*, 2006). As long as population pressure was low, the cropping phase was short compared to the fallow period. Three or four years of cultivation followed by ten years or more of fallow, for example allows the accumulation of easily degradable organic matter to regenerate soil fertility (Herrmann, 1996; Gaiser, 1999). Where population increases, available land per inhabitant is reduced and fallow periods shorten. Traditional long-fallow shifting cultivation can no longer continue in most of humid sub-Saharan Africa. Increasing population densities are posing a serious threat to natural resources and agricultural production. Farmers' response to higher food demand has been either an increase in cultivated area or/and a reduction of fallow period. The minimum fallow duration to maintain crop production was estimated at 12 years (Laudelout, 1990 quoted by Hauser, 2006). Fallow periods in most of the humid zone of West and Central Africa are actually between 5 and 2 years (Gockowsky *et al.*, 2002), reinforcing the need to seek alternative food production systems (Hauser, 2006).

Yam (*Dioscorea* spp) is a tuber crop widely cultivated in the humid and sub-humid lowland regions of West Africa and the Caribbean (Onwueme and Haverkort 1991). More than 90% of the worldwide production (40 Mt fresh tubers/year) is produced in West Africa (FAOSTAT, 2009). Yam is grown in traditional cropping systems as the first crop after land clearance, yielding about 10 t of fresh tuber/ha/year (Carsky *et al.*, 2001), but when the soil fertility is high, can easily reach 25-30 t/ha in farm fields (Vernier & Dossou, 2000) with *Dioscorea cayenensis-rotundata* varieties. In Benin nowadays, farmers hardly have the possibility to rely on long duration fallow and yam is being cultivated in 1 or 2-year herbaceous fallow or maize rotation systems with manual incorporation of residue into the soil (Doumbia, 2005; Maliki, 2006). Smallholder farmers removed important quantities of nutrient from their soil without applying a sufficient quantity of manure or fertilizer to replenish the soil (Saidou, 2006).

Yam is a demanding crop in terms of organic matter and soil fertility, especially the most appreciated and market-valued cultivars (early maturing *Dioscorea rotundata*) used for the popular dish called “fu-fu” (pounded yam) (Vernier & Dossou, 2003). According to Le Buanec (1972), harvest of 1 t of yam fresh tubers takes up to 3.8 kg of nitrogen, 0.39 kg of phosphorus and 4.2 kg of potassium. The amount of nutrients removed in the yam tuber harvest could, however, depend on growth rate and yield which in turn depends on climate, soil fertility conditions and variety. The quantities of soil N supply would depend on the yield potential of yam on a particular soil and of the soil’s ability to supply N. Levels of N decline rapidly once cropping commenced (Peoples *et al.*, 1995). Nitrogen supplied from the breakdown of inherent organic matter must be supplemented from other sources. Yam cultivation in West Africa is now confronted with the scarcity of fertile soil available for clearing (Cornet *et al.*, 2006). In degraded zones where long duration fallow periods were no longer available, market-oriented yam production either strongly decreased, or evolved toward more tolerant but also less profitable varieties such as late maturing *D. rotundata* or *D. alata* better adapted to poor soils (Vernier & Dossou, 2000).

Therefore, there is a dire need to economically assess in farmers’ conditions the performance of sustainable cultivation techniques. Ongoing soil degradation could be mitigated by the adoption of the new farming techniques such as improved fallow of herbaceous leguminous plants (Carsky *et al.*, 1998; Azontondé *et al.*, 1998; Carsky *et al.*, 1999; Becker *et al.*, 1999). This will serve an alternative solution to maintain the potentials of the land resources under the various prevailing economic, social and political environment. Where smallholders’ access to N fertilizer is limited, legume-based fallows, which, through symbiotic N-fixation, appear capable to provide more N than the natural fallow, allowing sole maize crops at high plant densities. Legumes improve soil fertility because of their ability to fix N₂ and produce N-rich residues that may be returned to the soil (Gaiser and Shantaram, 1984; Giller, 2001; Crews and Peoples, 2004).

In Benin and Togo, Sodjadan *et al.* (2005) studied the effect on the yam crop of short fallows based on *Mucuna pruriens* var *utilis*, *Aeschynomene histrix*, or *Pueraria phaseoloides*, and reported that a 1-year fallow planted with *Mucuna* led to a significant increase in yam yields. However, studies on the productivity of yam-based technologies with herbaceous leguminous plants like *Mucuna pruriens* var *utilis* and *Aeschynomene histrix* are lacking. We tested smallholders’ usual cropping sequences (1-year fallow of *Andropogonon gayanus*; maize) with alternative legume-based cropping systems (maize-*Aeschynomene histrix*; maize-*Mucuna pruriens* var *utilis*) in four village sites during the 2002-2005 in the

savannah transitional agro-ecological zone of Benin. Our aim was to determine the productivity of cropping sequences with herbaceous leguminous plants (dry matter, macronutrients removed and recycled, net nitrogen balance, constraints) and their effects on the profitability of the crop.

Materials and methods

Study sites

The study was carried out in the Guinea-Sudan transition zone of Benin (centre of Benin) in four sites: Miniffi (District of Dassa-Zoumè), Gomè (Glazoué), Akpéro, and Gbanlin (Ouessè) with latitudes 7 °45 ' and 8 °40' North and longitudes 2 °20 ' and 2 °35 ' East (Figure 1).

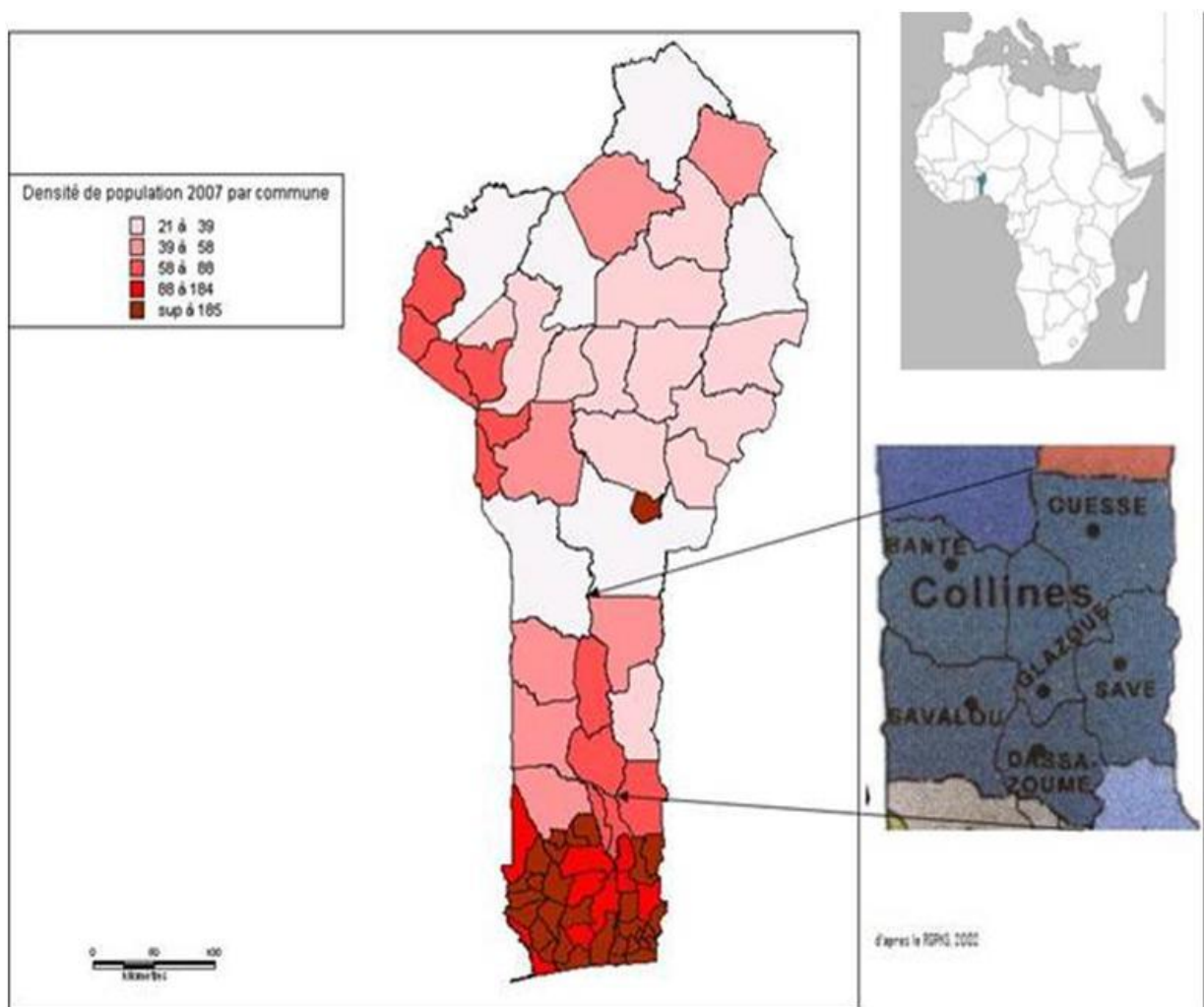


Figure 1 : Study area and population density

Data source: RGPH3, 2002

The climate is tropical transitional Guinea-Sudan with a rainfall distribution gradient from bimodal (Southern Benin) to monomodal (Northern Benin). The average annual rainfall during the study period were 1052 mm (2002), 1386 mm (2003), 983 mm (2004) and 797 mm (2005) (Figure 2).

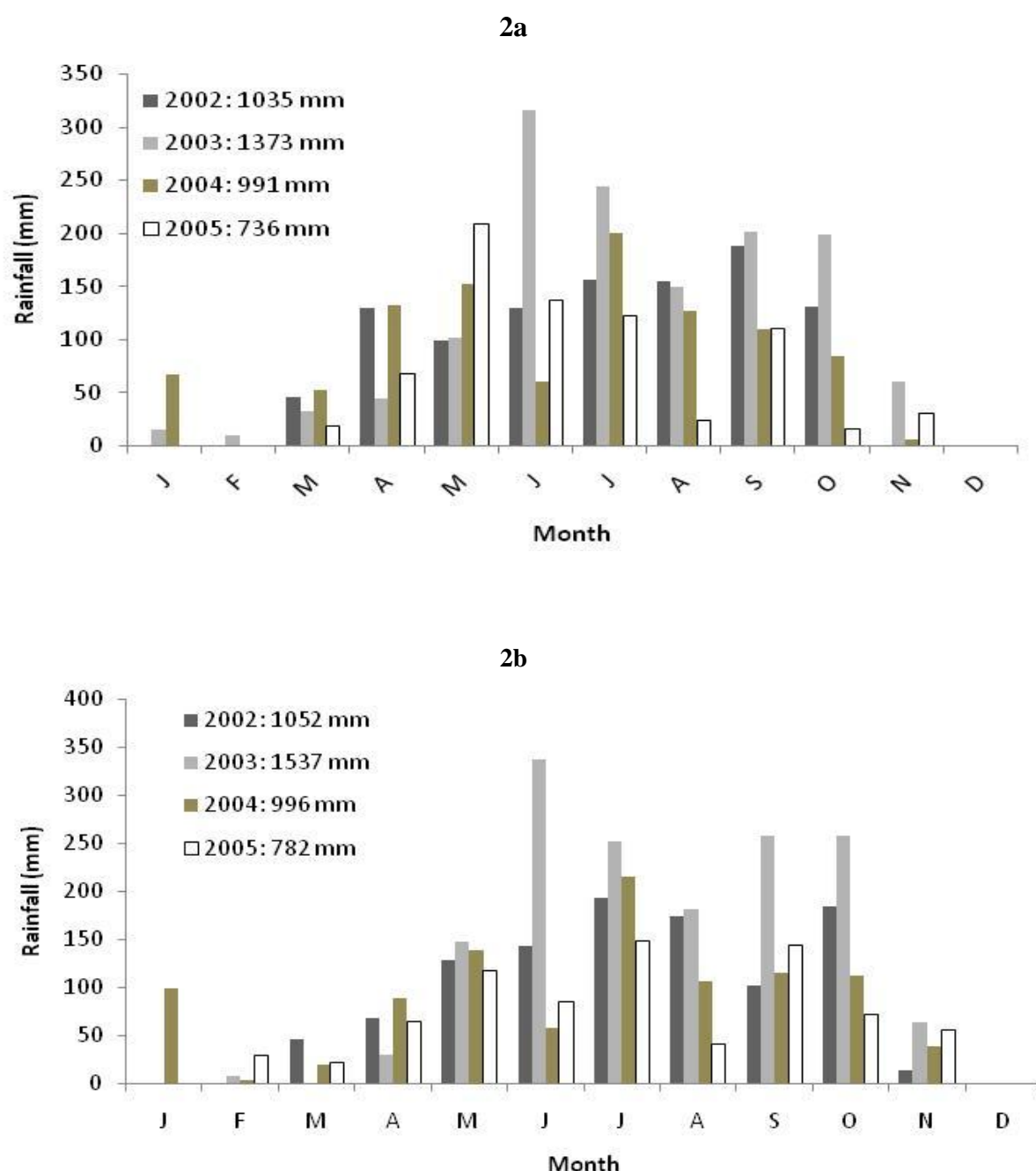
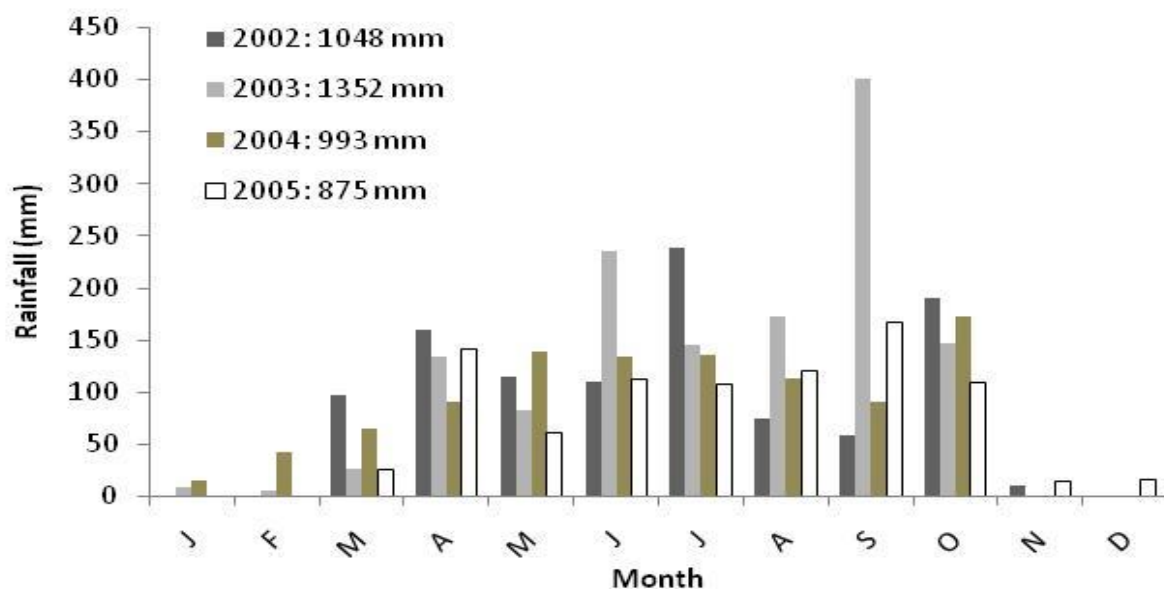
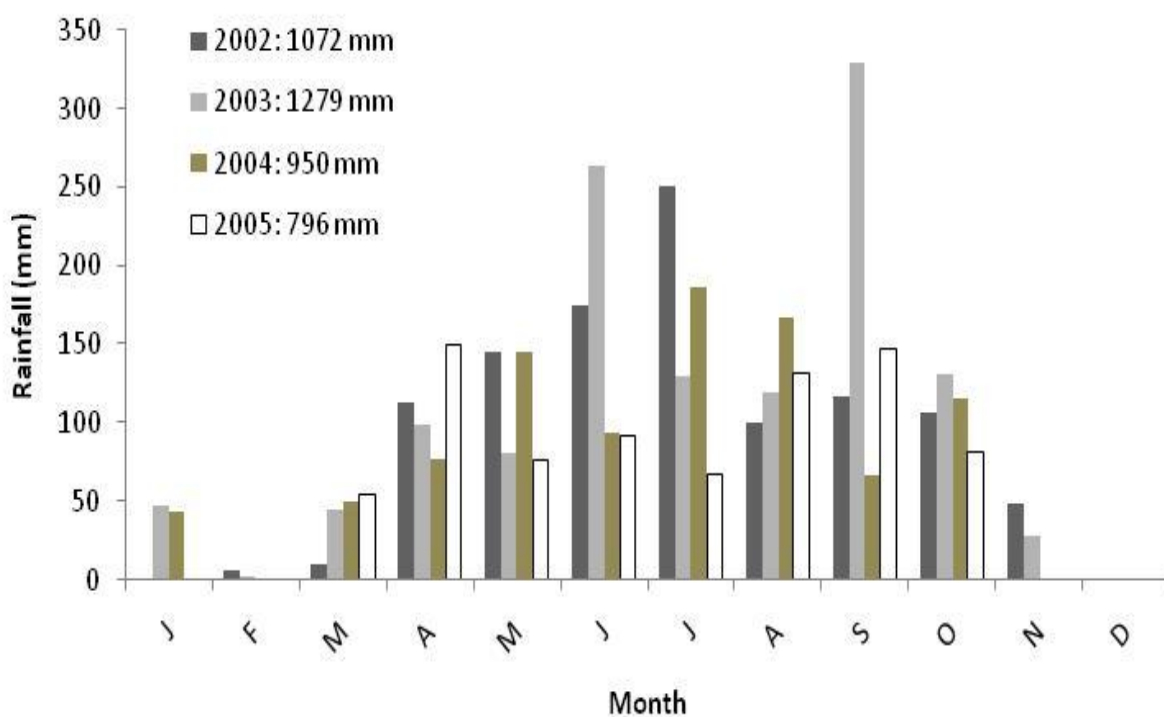


Figure 2: Monthly rainfall (mm) in the four village (Miniffi, Gomè, Gbanlin, Akpéro) during the 2002, 2003, 2004 and 2005 cropping seasons in the savannah transitional agro ecological zone of Benin: 2a: Akpéro; 2b: Gbanlin; 2c: Miniffi; 2d: Gomè

2c



2d



The rainfall regime in the study area is variable and unequal distribution (i.e. number of rainy days per month) varies from one site to another. The 2002 and 2003 cropping seasons were wet and had better rainfall distribution with an average annual precipitation of 1200 mm whereas 2004 and 2005 were dry (890 mm) with relatively low rainfall distribution.

Most of the soils are tropical ferruginous soils (Dubroeuq, 1977), originally from Precambrian crystalline rocks (granite and gneiss), and classified as plinthosols (Gbanlin and Akpéro), and luvisols (Miniffi and Gomè) (Agossou and Igué, 2002) (Table 1).

Table 1: Initial soil characteristics at the beginning of the experiment at 0-10 and 10-20 cm layers in four villages (Miniffi, Gomè, Gbanlin and Akpéro), Benin

	Akpéro		Gbanlin		Miniffi		Gomè	
Depth (cm)	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20
	“Plinthosols”		“Plinthosols”		“Luvisols ferric”		“Luvisols ferric”	
Clay%	6.6±0.3	7.3±0.3	5.8±0.3	5.7±0.3	6.8±0.3	6.5±0.3	6.8±0.3	7.9±0.4
Silt%	11.7±0.6	11.8±0.6	5.8±0.3	5.6±0.3	6.8±0.3	7.1±0.3	16.1±0.8	17.4±0.8
Sand%	81.7±0.9	80.9±0.9	88.4±0.5	88.7±0.5	86.4±0.6	86.4±0.6	77.1±1.1	74.7±1.2
C%	1.3±0.1	1.0±0.1	0.7±0.0	0.8±0.0	0.8±0.0	0.6±0.0	0.6±0.0	0.5±0.0
N%	0.1±0.0	0.09±0.0	0.06±0.0	0.08±0.0	0.08±0.0	0.05±0.0	0.07±0.0	0.06±0.0
C : N ratio	11.7±0.0	11.4±0.1	11.7±0.0	9.7±0.0	9.8±0.3	11.4±0.1	8.9±0.0	8.7±0.0
OM%	2.2±0.1	1.8±0.1	1.2±0.0	1.4±0.0	1.4±0.1	1.1±0.1	1.1±0.1	0.9±0.0
PH water	6.7±0.3	6.7±0.3	6.6±0.3	6.3±0.3	6.7±0.3	6.8±0.3	6.6±0.3	6.6±0.3
Bray P, ppm	20.1±1.1	14.9±0.6	7.0±0.3	4.0±0.2	11.0±0.5	3.0±0.2	8.0±0.4	4.0±0.2

Data are the means ± SD (Standard deviation); C%: soil carbon concentration (%); N%: soil nitrogen concentration (%); OM% (= 1.72× C%): soil organic matter content (%); C:N ratio: Index of biodegradability or ratio of soil carbon to nitrogen; Bray P, ppm: soil phosphorus (ppm).

Miniffi and Akpéro are located on a plateau (well drained soils) while Gomè is on lowland (more poorly drained soils). Gbanlin is located on an undulating plateau with concretions.

Natural vegetation is degraded wooded savannah. There is a rising gradient of fertility from the continuous cropping system on degraded soils towards the forests. This degradation is related to soil organic matter decrease, which leads to nutrient depletion (nutrients removed in the crop harvest, leaching and erosion). Maize, yam, cassava and groundnut are annual crops and the cash crops are cotton and soybean.

Population density and landscape vary according to the village site. Miniffi and Gomè are of ancient land occupation with 50 inhabitants km⁻², whereas Gbanlin and Akpéro, of recent land occupation, had about 25 inhabitants km⁻². Miniffi is located on a plateau, Gomè in lowlands with favorable humidity conditions. Akpéro and Gbanlin are located on a plateau.

On farm experiment

The concept of the experiment was, first of all, to produce residue biomass the first year followed by yam cropping the second year. Smallholders carried out two-year rotations experiment of yam-based cropping systems repeated twice (2002-2005) on-farm with single-harvest late maturing variety of yam “Kokoro” (*Dioscorea rotundata*). This is one of the most cultivated species in the study area due to its good aptitude for conservation, it's processed into dried tubers (the so-called chips), flour, and starchy paste (locally called *amala*) (Vernier and Dossou, 2003). Thirty-two farmers, eight in each site (Miniffi, Gomè, Akpéro and Gbanlin) were considered. For each of them, we used a randomized block design with four replicates and four levels of treatment. Plot size was 10 m × 10 m (400 m² per block, total of 1 600 m² per farm). The four cropping system treatments (cropping sequences) were as follows:

- A (Control 1): 1-year fallow rotation, which is a common practice in the area. A natural fallow of *Andropogon gayanus* grass grew in the first year.
- M (Control 2): maize rotation, which is also a common practice in the area. Maize was planted (spacing 80 cm × 40 cm) in April of the first year.
- MA: Intercropped *Aeschynomene histrix* with maize rotation: Maize was planted in April of the first year. *Aeschynomene* seeds (7 kg ha⁻¹) were mixed with dry sand (3/4 sand - 1/4 seeds) and sown two weeks after the maize.
- MM: Intercropped *Mucuna pruriens* with maize rotation. Maize was planted in April of the first year. *Mucuna* seeds (25 kg ha⁻¹) were sown at a spacing of 80 cm × 40 cm in May six weeks after maize.

On treatments M, MA and MM, 100 kg ha⁻¹ NPK fertilizer (14% N, 10% P, 11.7% K) was applied to maize in April and 50 kg ha⁻¹ urea (46% N) in June. The maize was harvested in July. The grainless *Mucuna* and *Aeschynomene* crops were mowed 140 and 180 days respectively after planting. Organic matter was partly incorporated in moulds and the rest as mulch in October, and then yam was planted directly on these mounds, without mineral fertilization.

Data collection

Soil characteristics

Composite soil samples were collected in each field before the beginning of the experiment along plot transects at soil depths of 0-10 cm and 10-20 cm (32 farm fields \times 2 depths = 64 samples) in order to determine initial soil characteristics.

Biomass and crops yield

Prior to ridging, composite residue samples (*Mucuna*, *Aeschynomene*, fallow of *Andropogon gayanus*) were taken in four 1 m² quadrats within each plot in October 2002 and 2004. The biomass samples were dried at 60 °C until constant weight and then dry weight was determined. At maturity, maize grain and stover were harvested per row on each plot and DM determined. Fresh yam tuber yields in metric tons per hectare were estimated on each plot in December 2003 and 2005.

Soil and plant nutrients content

The nutrient (N, P and K) content of the soil and cropping sequences (preceding yam) were performed in the Laboratory of Soil Sciences, Water and Environment (LSSEE) of INRAB (Benin National Research Institute). Nitrogen (N) content was analyzed using the Kjeldahl method, available soil phosphorus with the Bray 1 method; available plant phosphorus with the Weissflog and Mengdehl method, potassium with the FAO method, organic carbon with the Walkley and Black method, soil fractionation with Robinson method and pH (H₂O) (using a glass electrode in 1:2.5 v/v soil solution). Preceding yam, only maize grain was removed, and all other plants parts were recycled (*Andropogon*, maize stover, *Aeschynomene* and *Mucuna*). Dry matter removed or recycled was calculated as a summation of dry matter of the respective plant parts before the yam test crop. Nutrient removed or recycled was calculated as a summation of nutrient concentration time dry matter of the respective plant parts before the yam test crop.

The N₂ fixed by herbaceous legumes in each plot was not analyzed. We estimated N₂-fixed by herbaceous legumes in their aerial biomass based on the results of Houngnandan (1998), who reported that 55% N of *Mucuna* came from biological nitrogen fixation (BNF) in soils exhibiting severe nutrient depletion, and those of Becker and Johnson (1998) who reported that legumes could fix 70% of their N. We considered two rates of fixation of N₂ : 50% and 70% nitrogen content in the aboveground parts of the plant.

The base of calculation is related to the total plant N of each cropping sequence. It's assumed that all N fixed by legumes was available for yam. We considered equations as follows:

The total plant N for the crop sequence (maize-mucuna) for example = N that in the food crop (e. g., N removed by maize grains) + N in residue returned to the soil (e. g., N recycled in mucuna stover and N recycled in maize stover) = N_2 fixed + N from the soil (including N from fertilizers applied on the soil for maize).

Total plant N = N removed + N recycled = N_2 fixed + N from the soil

Net N balance = N_2 fixed + N recycled - Total plant N = N_2 fixed – N removed.

Then, Net N balance (kg ha^{-1}) of each cropping sequence before the yam test crop was computed through the formula: N_2 fixed- N removed.

Statistical analysis

ANOVA using the general linear model (GLM) procedure (SAS, 1996) was applied to Biomass dry matter (DM), macronutrients (N, P and K), N_2 -fixed, N net balance in cropping sequences preceding yam and yam yield using a partial nested model with five factors: year, replicate, farmer, site, and treatment. The random factors were “Year” and “Replicate”; “Farmer” was also considered as nested within “Site”. The fixed factors were “Treatment” and “Site”. Sites were considered as fixed based on certain criteria such as landscape (lowland, plateau), soil type, and initial soil fertility. Yield values were logarithmically transformed to normalize the data and to stabilize population variance. The GLM was computed to assess the interactions between the factors involved. When there were significant interactions between the main factors, Newman and Keuls test was used to determine differences between means.

Economic analysis

A simple financial analysis was performed to evaluate the profitability of each cropping system. The analysis included total revenue and production cost per hectare for each cropping system and site during four cropping seasons 2002-2005. From this, net revenues of each cropping system were evaluated during four cropping seasons (2002- 2005). Net revenue from the investment was given by: $NR = TR - TC$, where NR is the net revenue; TR the total revenue; and TC is total cost. Returns on investment (RI%) were also computed through the formula: $RI = 100 \times (NR/TC)$; when $RI >$ interest rate on capital, profitability is implied. Labour productivity was given by: $LP = NR/LP$, where LP is the total labour requirement.

Economic yields for maize in intercropping were based on 15% moisture content while that of yam was based on fresh weight. Costs of production were divided into land (hired land cost US\$ ha⁻¹ year⁻¹), inputs (maize, yam and legume seeds, fertilizers costs) and labour (farm activities costs for yam-based cropping systems establishment and management). Land, inputs and labour costs were determined based on local prices in the 2002-2005 cropping seasons. We considered the average annual prices for food crops (maize and yam) based on the prevailing market price (Glazoué market in the central Benin). All amounts are expressed in US dollars (524.98 FCFA to US\$ 1 May 24, 2010).

Results

Dry matter production

Biomass dry matter (DM) amounts recycled in the crop sequences with herbaceous legumes (MA and MM) were significantly higher ($P < 0.001$) than in traditional crop sequences (A and M) (Table 2).

Table 2: Dry matter (t ha⁻¹) of plant parts returned to the soil significantly increased according to four cropping systems (AM: *Aeschynomene histrix*-maize; MA: *Mucuna pruriens*-maize; A: 1-year fallow of *Andropogon gayanus*; M: maize) during the 2002 and 2004 cropping seasons in four villages in Benin

	Cropping season 2002	Cropping season 2004
Cropping system	DM (t ha ⁻¹)	DM (t ha ⁻¹)
<i>Andropogon</i> (A)	4.1c	3.9c
Maize (M)	3.5d	3.2d
Maize- <i>Aeschynomene</i> (MA)	9.2b	8.3b
Maize- <i>Mucuna</i> (MM)	9.7a	8.8a

In the 2002 and 2004 cropping seasons, the highest biomass DM amount recycled was recorded on *Mucuna*/maize intercropping (MM). No significant difference was observed between sites. In addition, no significant difference was observed between treatments for DM harvested.

Nitrogen removed by the harvested crop, nitrogen returned to the soil, net nitrogen balance, phosphorus and potassium contributions in cropping sequences

The partial nested model showed that the interactions Treatment and Farmer, Year and Treatment were significant for N, P and K amounts removed by maize grains ($P < 0.001$) (Table 3).

Table 3: Main factors effects of plant parts removed from the crop harvest and returned to the soil for various cropping sequences during the 2002 and 2004 cropping seasons in four villages in Benin

		N		P		K	
Source	DF	F	P	F	P	F	P
Plant parts removed from the crop harvest							
Farmer(Site)	28	5.7	0.000	5.7	0.000	5.7	0.000
Year	1	6.9	0.081	6.9	0.080	6.9	0.08
Replicate	3	513.0	0.000	122.2	0.000	122.2	0.000
Site	3	0.2	0.883	0.2	0.877	0.2	0.868
Treatment	3	92.6	0.001	92.7	0.001	90.1	0.001
Site×Treatment	9	0.5	0.861	0.7	0.733	0.7	0.731
Treatment×Farmer(Site)	84	8.0	0.000	2.7	0.000	2.7	0.000
Year×Treatment	3	54.9	0.000	55.1	0.000	55.1	0.000
Year×Site	3	0.4	0.78	0.4	0.78	0.4	0.777
Year×Site×Treatment	9	1.3	0.232	0.4	0.914	0.4	0.914
Error		877		877		877	
Adjusted R-square (%)		96.04		88.86		88.86	
Plant parts returned to the soil							
Farmer(Site)	28	2.8	0.000	3.7	0.000	3.8	0.000
Year	1	2.8	0.264	0.1	0.816	1.8	0.256
Replicate	3	697.9	0.000	128.0	0.000	147.8	0.000
Site	3	0.27	0.844	1.2	0.357	2.8	0.081
Treatment	3	75.1	0.000	10.1	0.003	141.2	0.000
Site×Treatment	9	8.2	0.000	32.2	0.000	3.5	0.018
Treatment×Farmer(Site)	84	6.35	0.000	1.6	0.001	1.7	0.000
Year×Treatment	3	1.8	0.211	0.5	0.709	2.5	0.123
Year×Site	3	0.6	0.6	4.5	0.033	2.4	0.139
Year×Site×Treatment	9	9.8	0.000	5.4	0.000	2.5	0.007
Error		877		877		877	
Adjusted R-square (%)		97.1		89.7		87.8	

ANOVA of main factors effects of N, P and K removed from maize grains and recycled for various cropping sequences: DF: Degree of freedom; F: Fisher's test; P: Fisher's probability test

In addition, the interactions Site and Treatment ($P < 0.05$), Treatment and Farmer ($P < 0.001$) were significant for N, P and K recycled in various cropping sequences. Nitrogen removed in the harvested crop (maize grains) was significantly higher ($P < 0.001$) in maize (M) than in maize-*Aeschynomene* (MA) and maize-*Mucuna* (MM). Whereas nitrogen returned to the soil (N recycled) was significantly higher ($P < 0.001$) in MA and MM than in A and M (Table 4). Phosphorus (P) and potassium (K) returned to the soil (recycled) were significantly higher in MA and MM than in A and M during both cropping seasons (Table 4).

Table 4: Nitrogen, phosphorus and potassium (kg ha^{-1}) of plant parts returned to the soil significantly improved with legumes/maize rotations (AM: *Aeschynomene histrix*-maize; MA: *Mucuna pruriens*-maize) during the 2002 and 2004 cropping seasons in four villages in Benin.

Treatment	2002 cropping season			2004 cropping season		
	N	P	K	N	P	K
<i>Andropogon</i> (A)	47.6 c	5.3 c	19.9 b	47.0 c	5.1 c	19.5 c
Maize (M)	31.9 d	4.6 c	17.5 c	33.5 d	4.7 c	17.4 c
Maize- <i>Aeschynomene</i> (MA)	147.4 b	12.7 b	54.8 a	137.1 b	12.9 b	49.3 b
Maize- <i>Mucuna</i> (MM)	169.4 a	15.8 a	56.5 a	161.5 a	15.1 a	54.5 a
LSD 5%	10.47	2.16	2.67	11.21	2.02	3.0
SD	16.01	3.31	4.08	17.14	3.09	4.6

Nitrogen, phosphorus and potassium (kg ha^{-1}) recycled in cropping sequences preceding yam during the 2002 and 2004 cropping seasons (4 sites, 32 farmers, Benin): a, b, c, d: Means with different superscripts in the same column differ significantly ($P < 0.05$); F-test for differences among means was always significant at $p < 0.001$
LSD: Least square difference at 5%; SD: Standard deviation

No significant difference was observed between treatments and sites for P and K removed. N_2 -fixed on different sites during both cropping seasons was not significant (Table 5).

Table 5: Main factors effects of nitrogen fixed and net nitrogen contribution (kg ha^{-1}) to the overall soil economy for various cropping sequences before yam planting during the 2002 and 2004 cropping seasons, depending on the fixation rate hypothesis (50% or 70%) in four villages in Benin

Source	DF	N ₂ -fixed (50%)		N ₂ -fixed (70%)		N net (50%)		N net (70%)	
		F	P	F	P	F	P	F	P
Farmer(Site)	28	1.4	0.119	1.4	0.119	2.3	0.002	1.8	0.022
Year	1	1.4	0.339	1.4	0.339	3.4	0.245	1.2	0.475
Replicate	3	256.8	0.000	75.8	0.000	16.4	0.000	58.6	0.000
Site	3	1.9	0.234	2.0	0.228	1.5	0.27	1.8	0.234
Treatment	3	801.1	0.000	886.2	0.000	638.0	0.000	1282.6	0.000
Site×Treatment	9	7.5	0.000	8.3	0.000	6.2	0.000	7.4	0.000
Treatment×Farmer(Site)	84	5.4	0.000	2.4	0.000	8.2	0.000	2.7	0.000
Year×Treatment	3	1.0	0.422	1.0	0.422	0.6	0.636	0.3	0.854
Year×Site	3	2.0	0.187	2.0	0.187	1.8	0.209	1.9	0.201
Year×Site×Treatment	9	8.3	0.000	3.7	0.000	11.0	0.000	3.9	0.000
Error		877		877		877		877	
Adjusted R-square (%)		97.1		93.5		96.6		91.6	

ANOVA of main factors effects of N fixed and net N balance of cropping sequences preceding yam with two assumption rates (50% or 70%) of N₂-fixation: N₂-fixed : Nitrogen biological fixation (NBF); N net: net nitrogen balance

Furthermore, ANOVA partial nested model showed that Treatment ($P < 0.001$), the interactions Site and Treatment ($P < 0.001$), Treatment and Farmer ($P < 0.001$) were significant for N₂-fixed and net N balance in various cropping sequences (Table 5). MM showed the highest Net nitrogen balance followed by MA. Negative Net nitrogen balance was found in A and M (Table 6).

Table 6: Nitrogen fixed and net nitrogen balance (kg ha^{-1}) of plant parts significantly increased with legumes/maize rotations (AM: *Aeschynomene histrix*-maize; MA: *Mucuna pruriens*-maize) during the 2002 and 2004 cropping seasons, depending on the fixation rate hypothesis (50% or 70%) in four villages in Benin

Cropping sequence	2002 cropping season					2004 cropping season				
	N ₂ -fixed		N removal through harvest	Net N balance		N ₂ -fixed		N removal through harvest	Net N balance	
	50%	70%		50%	70%	50%	70%		50%	70%
A	0 c	0 c	0 b	0c	0 c	0 c	0 c	0 c	0 c	0 c
M	0 c	0 c	34.9 a	-34.9 d	-34.9 d	0 c	0 c	31.5 a	-31.5 d	-31.5 d
MA	58 b	81.2 b	34.4 a	23.5 b	46.7 b	53.9 b	75.4 b	27.7 b	26.2 b	47.7 b
MM	69.5 a	97.3 a	33.4 a	36.1 a	63.9 a	66.6 a	93.3 a	26.7 b	39.9 a	66.6 a
LSD 5%	3.29	5.68	2.19	2.97	6.1	3.47	4.86	1.94	3.47	4.7
SD	10.11	17.43	6.74	9.11	18.72	10.66	14.92	5.96	10.66	14.4

Nitrogen fixed and net nitrogen balance (kg ha^{-1}) of cropping sequences preceding yam with two assumption rates (50% or 70%) of N₂-fixation; a, b, c, d: Means with different superscripts in the same column differ significantly ($P < 0.05$); F-test for differences among means was always significant at $p < 0.001$; A: *Andropogon*, M : Maize, MA : Maize-*Aeschynomene*, MM : Maize-*Mucuna*

Relative profitability of the various crop rotations

Results of the economic analysis indicated net revenues significantly higher in yam-based cropping systems with herbaceous leguminous plants (AM, MM) than in traditional systems (A, M). All cropping systems resulted in net positive revenues between US\$149 and US\$2,3 during both cropping seasons. This corresponded to return on investment ranging from 44% to 191%. MA and MM demand an additional labour (215 and 212 Man-Day ha^{-1}) compared to the traditional yam-based system A (140 Man-Day ha^{-1}) but allowed for a significantly better labour productivity (between US\$9.5 and US\$10.8 man-day⁻¹) (Table 7).

Table 7: Production cost, gross revenue (US\$ ha⁻¹), labour productivity (US\$ man-day⁻¹) and return on investment (%) significantly increased with legumes/maize rotations (AM: *Aeschynomene histrix*-maize; MA: *Mucuna pruriens*-maize) versus the two control rotations (A: 1-year fallow of *Andropogon gayanus*; M: maize) during the 2002-2003 and 2004-2005 cropping seasons in four villages in Benin.

		<i>Andropogon</i> - yam (A)	Maize- yam (M)	Maize- <i>Aeschynomene</i> - yam (MA)	Maize- <i>Mucuna</i> -yam (MM)
2002-2003 cropping seasons	Yam yield (t ha ⁻¹)	10.2b	7.7c	14.4a	14.7a
	Maize yield (t ha ⁻¹)	-	1.9a	1.6b	1.3c
	Income (US\$)	1,9b	2,0b	3,2a	3,2a
	Production cost (US\$)	891a	1,2b	1,2b	1,2b
	Net income (US\$)	149b	264a	2,0c	2,0c
	Return on investment (%)	118b	70c	169a	167a
	Labour (Man-Day ha ⁻¹)	140c	211ab	215a	212b
	Labour productivity (US\$)	7.5b	3.8c	9.5a	9.8a
2004-2005 cropping seasons	Yam yield (t ha ⁻¹)	8.7b	6.0c	15.9a	16.1a
	Maize yield (t ha ⁻¹)	-	1.9a	1.5b	1.4c
	Income (US\$)	1,7b	1,7b	3,5a	3,4a
	Production cost (US\$)	891a	1,2b	1,2b	1,2b
	Net income (US\$)	763a	519b	2,3c	2,3c
	Return on investment (%)	86b	44c	190a	191a
	Labour (Man-Day ha ⁻¹)	140c	211ab	215a	212b
	Labour productivity (US\$)	5.2b	2.5c	10.5a	10.8a

a, b, c : Means with the same letter within column are not significantly different ($p < 0.05$); F-test for differences among means was always significant at $p < 0.001$; t: ton, US\$ 190.5 t⁻¹ for yam fresh weight; US\$ 285.7 t⁻¹ for maize; 1 US\$ = 524.98 FCFA (May 24, 2010).

Discussion

Dry matter production

The highest biomass DM amount recycled was recorded on *Mucuna*/maize intercropping (MM). *Mucuna* grows rapidly and DM production can reach 10 t ha⁻¹ (Azontondé, 1993; Lal, 1995; Carsky et al., 1998). In fact, *Mucuna* creeps and climbs maize

straws in pattern crop allowing the lianas staking. Therefore, *Mucuna* large leaves profit from solar radiations improving the photosynthetic activity and the plant productivity. *Mucuna* reaches the physiological maturity (flowering time) between 180 and 240 days after grains planting in the study area in comparison with *Aeschynomene* (200 - 306 days) (Maliki *et al.*, 2007a, 2007b).

Nitrogen removed by the harvested crop, nitrogen returned to the soil, net nitrogen balance, phosphorus and potassium contributions in cropping sequences

All nitrogen requirements in A and M were obtained from soil and (fertilizers for M in particular), whereas in MA and MM, nitrogen was presumably from biological nitrogen fixation, soil and fertilizers.

In our study, soil chemical analysis showed that the soil was deficient in N, P and K. Many studies focusing on these elements conclude that there is an indisputable need to correct the lack of N and P in the soil in Africa (Azontondé, 1993; Gaiser, 1999). Rotations with *Mucuna* and *Aeschynomene* represented a source of easily available N, P, and K for the yam crop which could be related to their faster decomposition and nutrient release, compared with the slower release of nutrients by poorer quality materials such as maize stover and *Andropogon* grass.

These results confirmed former work of Adjei-Nsiah *et al.* (2007). The largest net N contribution to various systems in Ghana was made by pigeonpea cropping system followed by *Mucuna*-based cropping system (*Mucuna*–maize– *Mucuna*). This could be related to the prolific character and highest nitrogen symbiotic fixation by *Mucuna* and its faster decomposition. Decomposition data indicated that 6 weeks after incorporation of biomass, only 30% of *Mucuna* remained (Adjei-Nsiah *et al.*, 2007). Van Noordwijk *et al.* (1995) and Triomphe (1996) estimated that approximately 83% of nitrogen produced by the mulch of *Mucuna* was available for the subsequent maize crop. It is generally allowed that the incorporation of the biomass into the soil gets more nitrogen to the succeeding crop than the mulch application on the soil because the decomposition of organic matter is more rapid after incorporation (Hulugalle *et al.*, 1985; Franzen *et al.*, 1994; Ibewiro *et al.*, 2000). Osei-Bonsu and Buckles (1993) estimated that *Mucuna* as an intercrop or as a sole crop provided an equivalent of more than 100 kg N ha⁻¹ to the following maize. This is similar to an amount Sanginga *et al.* (1996) estimated for the bimodal-rainfall zone of southwestern Nigeria. Despite a large variability in litterature, the mean N accumulation in leguminous cover crops

is reportedly high (about 100 kg N ha⁻¹). A major share of this N (about 70%) appears to be derived from biological N fixation (Peoples & Craswell, 1992; Ladha and Garrity, 1994; Becker *et al.*, 1995; Ladha *et al.*, 1995; Peoples *et al.*, 1995). Low soil nutrient contents, variable rainfall distribution, excessive soil moisture in lowlands in rainy years should influence the amount of N₂ that is fixed. The rate of N₂ fixation is directly related to the growth rate of the legume. Furthermore, soil moisture deficiency as well as water logging has a pronounced effect on N₂ fixation because nodule initiation, growth, and activity are all more sensitive to water stress than general root and shoot metabolism. *Aeschynomene* reduces N fixation when subjected to soil moisture deficit (Albrecht *et al.*, 1981). Sellstedt *et al.* (1993) found that N derived from N₂ fixation decreased by about 26% as a result of water deficiency. Finally, P, very deficient in the soil in our study area, appears to be essential for both nodulation and N₂ fixation (Pereira & Bliss, 1989): along with N, it is a main yield-limiting nutrient in many regions of the world.

Soil P contents were low in the study area. Former works concluded that there is an indisputable need to correct deficiency of soil P in Africa (Azontondé, 1993; Gaiser *et al.*, 1999). Legumes fallows with *Mucuna* are known especially for improving the quantity of available P fractions in the soil for subsequent crops (Salako and Tian, 2003). Nevertheless, it depends on the inherent P levels in the soils. *Mucuna* root exudates could solubilize P increasing its availability.

K could become a limiting factor. Soil K concentration was not determined in our study. According to the former work of Igué (2000) in the area, K showed significant differences with respect to depth and cultivation time. The soil K concentration was 0.82 cmol kg⁻¹ at 0-20 cm depth compared with 0.49 cmol kg⁻¹ at 20-40 cm depth. The soil K content decreased significantly with cultivation. The rate of decline was about 0.023-0.054 cmol kg⁻¹ year⁻¹ for 0-20 cm depth and about 0.012-0.026 cmol kg⁻¹ year⁻¹ for 20–40 cm depth. The use of continuous herbaceous yam-based systems could limit K depletion in the study area.

Relative profitability of the various crop rotations

These results agree the work of Adjei-Nsiah *et al.* (2007) that showed the profitability of *Mucuna*- based cropping system on subsequent maize in Ghana. Furthermore, former work reported the profitability of herbaceous legumes in yam and cassava-based cropping systems (Olarindé, 2006). Annual farm incomes were higher under the repeated leguminous cover

crops method (RLCC) in southwestern Nigeria for food crops, mainly with yam and cassava (Olarindé, 2006).

Conclusions

The study highlighted how smallholder farmers who practice intercropped *Mucuna pruriens* with maize-yam rotation and intercropped *Aeschynomene histrix* with maize-yam rotation can meet their immediate food security and cash needs while maintaining their soil fertility. The production of yam on marginal land where cropping sequences with herbaceous leguminous plants (*Mucuna pruriens* var *utilis* and *Aeschynomene histrix*) are used and incorporated into the soil can serve as a means of allowing smallholder farmers with limited access to finance to improve the fertility of their soils without additional labour requirement.

Highest dry mater, nutrients recycled and net nitrogen contribution were found with *Mucuna* preceding yam ($P < 0.001$). Highest net revenue and return on investment were achieved in yam-based with legumes. Yam-based cropping systems with herbaceous leguminous plants demand an additional labour (215 and 212 Man-Day ha^{-1}) with *Aeschynomene* and *Mucuna* respectively during both cropping seasons compared to 1-year fallow of *Andropogonon* (140 Man-Day ha^{-1}) but allowed for a significantly better labour productivity. The study thus suggests that these systems could be an alternative for traditional continuous cropping systems and long duration fallow. They can be used and adapted by different categories of farmers depending on their circumstances and available resources (e.g. land, labour and cash). A detailed attention deserves to be given to the technical, institutional and political needs toward end-users in order to impel a dynamics for the adoption of yam-based technologies with herbaceous leguminous plants. This influence may be strengthened by suitable organizational arrangements to popularize adapted technologies, involving researchers, extension workers and farmers.

The chapter 2.2 discusses of the impact of different rotations with herbaceous legumes promoted by the research on yam yield, soil properties and draw out implications for conservation.

Chapitre | 2.2.

Sedentary yam-based cropping systems with legumes as solutions for soils conservation and forests protection in West Africa

R. Maliki, B. Sinsin, D. Cornet, E. Malezieux

Agriculture, Ecosystems and Environment (submitted in 2012)

Chapitre 2.2.

Sedentary yam-based cropping systems with legumes as solutions for soils conservation and forests protection in West Africa

Abstract

In West Africa, yam cultivation is now facing increasing scarcity of fertile soils. With the aim of designing more sustainable yam cropping systems in Central Benin, we compared smallholder farmers' traditional yam-based cropping systems with late maturing *Dioscorea rotundata* -'Kokoro' (1-year fallow of *Andropogon gayanus*-yam rotation, Maize+ 100 kg N₁₄P₂₃K₁₄ + 50 kg Urea –yam rotation) with yam-based cropping systems integrating legumes (*Aeschynomene histrix* /maize intercropping + 100 kg N₁₄P₂₃K₁₄ + 50 kg Urea –yam rotation and *Mucuna pruriens* var *utilis*/maize intercropping + 100 kg N₁₄P₂₃K₁₄ + 50 kg Urea –yam rotation) in a 4-year experiment comprising two year rotations. The objective of the study was to assess the impact of these different rotations on yam yield, soil properties, adoption intensity and draw out implications for conservation. Fallows improved more soil organic matter than maize crop residues, and intercropped herbaceous legume/maize fallow than fallow of *Andropogon*. Rotations with legumes improved significantly yam yield by around 40% (15 t ha⁻¹ fresh matter against less than 9 t ha⁻¹ in traditional rotations). Nutrients balances are negative in traditional systems. The maize rotation, in particular, shows a positive balance of phosphorus. The prediction of the humic balance according to a planning horizon of 40 years (average life cycle of a farm household in the area) revealed that the yam-based cropping systems with legumes increases the rate of SOM ranging from 0.25 to 1.80% against - 0.21 to 1.47% in traditional rotations. The soil organic matter concentration over the 40-year period should vary from 1.8 to 3.4% in yam based cropping systems with legumes versus 1.3 to 3.0% in traditional systems. Soil erosion rates using the universal soil loss equation (USLE) show amounts ranging from 5.1 to 23.6 t ha⁻¹ year⁻¹. Soil erosion in *Andropogon gayanus* rotation (12.2 t ha⁻¹ year⁻¹) was significantly higher than in maize or in pattern crops legumes/maize (around 10.3 t ha⁻¹ year⁻¹). In addition, nutrients (N, P, and K) eroded in *Andropogon gayanus* were significantly higher (9.3, 1.4, and 4.7 kg ha⁻¹ year⁻¹) than in the other treatments ranged (7.8, 1.1, and 3.9 kg ha⁻¹ year⁻¹) respectively. Intensity of adoption using multinomial model still remains low (4 and 6%) for rotations with *Aeschynomene* and *Mucuna* respectively. We thus suggest both mulching and biomass

incorporation into the soil in yam based-cropping systems with legumes. Improved rotations with legumes could contribute to reduce slash-and-burn and shifting cultivation systems, greenhouse gas emissions in land or soils related processes, or increase soil capacity to act as a carbon sink.

Keywords: Deforestation; *Dioscorea rotundata*; Herbaceous legumes; Humus balance; Intensity of adoption; Nutrients balance; Soil erosion..

1. Introduction

Because of anthropogenic pressure, forest ecosystems in humid and sub-humid lowland regions of West Africa are undergoing increasingly intense degradation (Conservation International, 2007). In these areas, cropping systems are based on tuber crops, mainly yam (*Dioscorea* spp.) (Onwueme and Haverkort, 1991). Current yam-based cropping systems, which involve slash-and-burn practices or short fallow, often result in deforestation and soil nutrient depletion, and yam cultivation is currently facing increasing scarcity of fertile soils (Cornet et al., 2006).

West Africa produces more than 40 million tons of yams per year, representing 90% of the world production (FAOSTAT, 2011). Benin is the world's fourth ranking producer, after Nigeria, Côte d'Ivoire, and Ghana. In Benin, yam production increased from 1 285 858 tons on an estimated 117 255 ha harvested area in 1995 to 1 802 944 tons in 2008 on 204 683 ha (FAOSTAT, 2011). This 40% increase in production was obtained thanks to a 74% increase in land under yam, indicating that intensification was limited. In Benin, yam is grown by smallholder farmers. Nowadays, it is impossible for farmers to practice long fallow periods and yam is cultivated in 1 or 2-year herbaceous fallow–yam or maize–yam rotations with manual incorporation of residues into the soil. Depending on the availability of cash and inputs, smallholders fertilize the maize they grow on depleted soils. However, they avoid using fertilizers on yam because it is “presumed to have a negative effect” on the quality of pounded yam (Vernier and Dossou, 2003). On depleted soils in the study area, the production of profitable yam cultivars has either decreased significantly, or changed from early maturing *Dioscorea rotundata* in favor of less profitable species such as late maturing *D. rotundata* or *D. alata*, that are better adapted to poor soils (Vernier and Dossou, 2003). Carsky et al. (2001) reported low yields, with an average of 10 t ha⁻¹ fresh yam for *D. cayensis-rotundata*, whereas for species like *D. rotundata* grown in fertile soil, the potential yield can reach 25-30 t ha⁻¹ (Vernier and Dossou, 2003) and 60-75 t ha⁻¹ for *D. alata* (Martin, 1974; Zinsou, 1998).

Yam requires more than 1 000 mm water in the first 20 weeks of growth (Ghosh *et al.* 1988), and variable rainfall (delayed rainfall, drought, and flooding) can have negative impacts on crop growth and development. Ghosh et al. (1988) consider delayed rainfall to be one the main reasons for the decrease in yam production.

Yam is a demanding crop in terms of organic matter and nutrients. Degras (1986) reported that for a 30 t ha⁻¹ yield of fresh yam yield 120 N kg ha⁻¹, 5.1 P kg ha⁻¹ and 111 K kg

t⁻¹ was required. Tropical soils can supply such quantities of nitrogen (N) when it is virgin land which has been newly cleared. Nitrogen is generated by the breakdown of inherent organic matter and needs to be supplemented with other sources of organic materials or mineral fertilizer. Many studies quoted by Balesdent (1996) report that soil organic matter (SOM) decreases in cultivated soils. This decrease is linked to the depth of the cultivated soil layer and is probably exacerbated in yam based-cropping systems. Two fractions of SOM can be distinguished. The first fraction, humus, is the most abundant. It ensures the formation of the clay-humus complex and soil micro-aggregation. The other fraction, which is unstable, consists of young organic carbon and is linked to soil macro-aggregation, the mineralization capacity of the soil and biological activity. When land is used too intensively and fresh organic matter is insufficient, the SOM is rapidly reduced in the unstable fraction. In the short and medium term, this reduction leads to a decrease in soil biological activity, and affects the aggregation of the soil thus causing a reduction N supply to the crop and in the average diameter of the aggregates, which in turn, contributes to soil degradation and depletion (Quenum et al., 2004).

It is possible to stop ongoing soil degradation and the decrease in yield thanks to new farming practices, such as rotations including improved short fallows or intercropping with herbaceous legumes. However, up to now, such practices have generally focused on cereals, and very rarely on root and tuber crops, especially yam (Aihou, 1998; Cornet et al., 2006). Over the past 30 years, studies have been conducted to find ways to improve soil fertility management and conservation using herbaceous legumes such as *Mucuna pruriens* or *Aeschynomene histrix* (Becker and Johnson, 1998; Carsky et al., 1999). In West Africa, in the last decade, *M. pruriens* has been tested as green manure or in a short fallow in a maize rotation and was found to considerably increase maize grain yield (Fofana et al., 2005). These crops have only recently been introduced in research projects and are therefore not yet widely reported in the literature (N'Goran et al., 2007). In Benin and Togo, Sodjadan et al. (2005) studied the effect on the yam crop of short fallows based on *Mucuna pruriens* var *utilis*, *Aeschynomene histrix*, or *Pueraria phaseoloides*, and reported that a 1-year fallow planted with *M. pruriens* led to a significant increase in yam yields.

To promote more sustainable yam production in West Africa, we conducted on-farm research on sedentary yam-based cropping systems in the Guinea-Sudan transition zone of Benin. The aim of our study was to compare traditional rotations with yam as the main crop + a 1-year fallow with *Andropogon gayanus*, or with maize crop as the previous crop, with rotations including a herbaceous legume (*A. histrix* and *M. pruriens*) intercropped with maize.

In particular, we assessed the impact of these different rotations on yam yield, soil properties and draw out implications for conservation.

2. Materials and Methods

2.1. Study sites and experiment design

Study sites and experiment design are described in chapter 2.1.

2.2. Data collection

Composite soil samples were collected in each field in November 2001 at depths of 0-10 cm and 10-20 cm (32 farm fields \times 2 depths = 64 samples). At the end of 2005 after yam harvesting, composite soil samples were collected at the same depths in the mounds along plot transects (32 farm fields \times 4 treatments \times 2 depths = 256 samples). Consequently, the error that may arise from this soil sampling procedures should be soil physical and chemical characteristics from mounds in 2005 reorganized in comparison with soil sampling in 2001 on a flat field.

The aboveground and root biomass of maize, *A. gayanus* and each herbaceous legume were collected separately in October-November 2002 and 2004 in four 1 m² quadrats within each plot. A 100 g subsample of each type of biomass was taken in each 100 m² plot. The four subsamples from four replications of each treatment were mixed to form a 400 g composite sample for each type of biomass and treatment. In total, for each farm we analyzed six aboveground composite plant samples in 2002 and six in 2004: maize stover TM, *A. histrix* biomass TMA, maize stover TMA, *M. pruriens* biomass TMM, maize stover TMM. The biomass samples were dried at 60°C until constant weight and dry weight was determined. At maturity (July), maize grain was harvested in each row in each plot and DM was determined. The fresh weight of the yam tuber was estimated for each plot in December 2003 and 2005 and the DM of yam shoots was determined.

Soil and plant macronutrients content (N, P, and K) were analyzed. Soil analyses were carried out on pH (H₂O) (using a glass electrode in 1:2.5 v/v soil solution), total N (Kjeldahl digestion in a mixture of H₂SO₄- Selenium followed by distillation and titration), available P (Bray 1 method), K (using atomic absorption spectrophotometry) and organic carbon (Walkley and Black method). Total N in the plant was analysed by wet digestion in a mixture

of H₂SO₄- Selenium followed by distillation and titration, K was measured by atomic absorption spectrophotometry and P was measured colorimetrically by ammonium molybdate with ascorbic acid.

The total soil organic matter rate of each site was given by the formula (%SOM = %C×1.72) where %C is the average total carbon rate at a depth of 20 cm.

2.3. Calculation of soil organic matter balance

We used the model of Hénin-Dupuis (1945) in exponential form (Van Dijk, 1980) to estimate the soil organic matter balance. This model calculates the organic matter concentration towards which a soil tends to balance when subjected during an infinite time to a constant mode of organic restitution and a constant technical itinerary. The model equation is as follows:

$$y_t = (K_1 x / K_2) \times (1 - e^{-K_2 t}) + y_0 e^{-K_2 t} \quad (1)$$

where

t = time (year); we considered a maximum time horizon of 40 years (average life cycle of a farm in our study area);

y_t = quantity of humus at time t (t ha⁻¹)

y₀ = quantity of humus at time t=0 (t ha⁻¹)

K₁x = stable organic matter (t ha⁻¹) = ∑k_{1i}x_i (2)

K_{1i} = isohumic coefficient (%) attributed to each source of organic material = (quantity of humus/quantity of each source of organic matter supplied)×100 (3)

x_i = annual quantity of aboveground parts or roots of each source of organic matter supplied (t ha⁻¹)

K₂ = mineralization coefficient (%) = (quantity of mineralized humus/quantity of stored humus)×100 (4)

K₁ characterizes soil organic matter yield related to organic material supplied.

The K₁ coefficient is characteristic of the composition of the organic residues (Mary and Guérif, 1994). A highly fermentable green manure (i.e. green legumes) is mineralized rapidly and supplies little carbon to the soil: its isohumic coefficient (or humification coefficient) is low (5%) (French Ministry of Cooperation, 1993). Incorporated lignified residue (maize stover) supplies much more stable organic matter to the soil: its isohumic coefficient is relatively high, e.g. from 15% to 25% for straw (French Ministry of

Cooperation, 1993; Soltner, 1994), and 21% for maize roots (Bolinder, 2003). We considered K_1 (5%) for aboveground parts and roots of green manures (*A. histrix* and *M. pruriens*) and yam shoots (15%). The isohumic coefficient of straw is lower than that of roots (Serpantié and Ouattara, 2001). For maize stover or *A. andropogon* grass of roots we used 20% and 23% respectively.

The coefficient of mineralization K_2 represents the annual rate of destruction of soil organic matter, which mainly depends on the soil and climatic conditions but also on the restitution of organic matter to the soil and K_2 increases if restitution is high (Mary and Guérif, 1994). Rémy and Sailor-Laflèche, (1996) used a grid of estimated K_2 ranging from 0.007 to 0.02 depending on the type of the soil (clay and limestone content, pH, etc.). However, the soil typology of their grid does not correspond to the classification of the soils in our study area. Taking into account uncertainty on the values, for the sensitivity analysis in our study, we considered K_2 to range from 0.005 to 0.03.

To determine the quantity of initial humus y_0 (t ha^{-1}) we used the top 20 cm soil layer and the volumic mass (d_a) of the soil to calculate the average weight (P_m) of the soil (t ha^{-1}).

$$d_a = (P_m / h \times S) \quad (5)$$

where

d_a = apparent density (g cm^{-3})

P_m = weight of soil (t ha^{-1})

h = soil depth (20 cm)

S = soil surface (10 000 m^2)

We determined average d_a to be 1.45 g cm^{-3} in the study area. The total soil organic matter rate of each site was given by the formula ($\% \text{SOM} = \% \text{C} \times 1.72$) where $\% \text{C}$ is the average total carbon rate at a depth of 20 cm. The first fraction of SOM is humus, which is the most abundant fraction (Quenum *et al.*, 2004). Soil humus was not analyzed in our study. We assumed that the total soil organic matter at each site contained 95% of humus. The quantity of initial humus y_0 becomes:

$$y_0 = \text{SOM} \times P_m \times 95 / 100 \quad (6)$$

where

SOM = average soil organic matter rate (%) at a soil depth of 20 cm

P_m = weight of soil (t ha^{-1})

2.4. Calculation of nutrient balances

With regard to the estimation and calculation of the nutrient inputs (INs) and outputs (OUTs), the methodology described by Stoorvogel and Smaling (1990) and Smaling and Fresco (1993) was applied to each experimental unit. The following INs and OUTs were assessed:

INPUT1: Application of inorganic fertilizer

INPUT2: Organic fertilizer recycling

INPUT3: Atmospheric deposition

INPUT4: Biological nitrogen fixation

INPUT5: Sedimentation deposition

OUTPUT1: Removal of harvested products

OUTPUT2: Leaching of N and K

OUTPUT3: Gaseous losses of N

OUTPUT4: Erosion

INPUT1 is the application of inorganic fertilizer. The organic fertilizer recycling (INPUT2) is calculated by multiplying the quantities incorporated with the mass fractions of N, P and K. Nutrient supplies by wet and dry deposition (INPUT3) were estimated from the experimental results of Stoorvogel *et al.* (1997a). They found average concentrations (mmolm^{-3}) of solutes in rain water of 0.04 P, 3K, 5 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and 6 $\text{NO}_3^-\text{-N}$. These concentrations were combined with the total amount of rainfall from January until December in the 2002-2003 and 2004-2005 cropping seasons. Nutrient inputs from Harmattan dust as found by Stoorvogel *et al.* (1997b) were used to estimate the input by dry deposition kg ha^{-1} at 0.11 for P and 2.50 for K. As legume crops were grown, biological N-fixation (INPUT4) consisted of symbiotic and non-symbiotic N_2 -fixation. The N_2 fixed by herbaceous legumes in each plot was not analyzed. We used Becker and Johnson (1998) results who reported that legumes could fix 70% of their N. The non-symbiotic N_2 -fixation was estimated as a transfer function of mean rainfall (van den Bosch, 1994). The input by sedimentation (INPUT5) was assumed to be negligible. The outputs of N, P and K by the harvest products such as maize and yam tubers (OUTPUT1) were calculated by multiplying the respective quantities of dry matter with the nutrient mass fractions. Leaching (OUTPUT2) of phosphorus was assumed to be negligible. The amount of N leached is assumed to be dependent on clay content, mineral soil N, rooting depth, annual precipitation, organic carbon content and N uptake by the crop. The amount of K leached is assumed to be dependent on exchangeable K, fertilizer K, rainfall and clay content (Smaling *et al.*, 1993).

The mineral soil N (in kg ha⁻¹) in the soil top layer was estimated from the NO₃⁻-N and NH₄⁺-N data, the volumic mass (1.4 kg dm⁻³) and soil depth (20 cm). Gaseous losses of N (OUTPUT3) through ammonia volatilization were assumed to be negligible (Smaling, 1993), although a little NH₃ may have escaped because pH (H₂O) was around 7. Losses through denitrification were estimated using the transfer function of Smaling, Stoorvogel and Windmeijer (1993) as determinants of rainfall, soil texture (clay content), mineral soil-N, fertilizer-N, N mineralized from organic fertilizer and total N uptake during the cropping season. Soil erosion (OUTPUT4) was estimated with the universal soil loss equation (USLE) (Wischmeier and Smith, 1978):

$$A = RKSLCP \quad (7)$$

where A is the annual soil loss in kg ha⁻¹, R the rainfall erosivity, K the erodibility, S the slope gradient, L the slope length, C the land cover and P is the land management. Slope gradients ranged from 3.5 to 4.3%. A detailed explanation is given by Ssegane (2007). We used 0.76 kg, 0.26 kg, and 0.46 kg t⁻¹ eroded sediment for N, P₂O₅ and K₂O respectively (Smaling and Fresco, 1993). Next, the balances of available nutrients were calculated.

$$\text{Balance} = \left(\sum \text{input} - \sum \text{output} \right) \quad (8)$$

2.5. Intensity of adoption of technologies

Legumes have been introduced in the study area in 1990. The adoption is confirmed when the legume fallow (adapted or not by the farmer) is replicated spontaneously (without the support of the research) within a farm plot (at least 350 m²) for a subsequent crop (yam). Survey in 306 farm households was conducted in the study area using the multinomial model to assess the adoption of yam-based cropping systems with legumes. The intensity of the adoption of technologies is estimated (ratio technology area-total arable land area). It depends on the adoption rate, the total area of arable land, the population density (ranged from 25 to 50 inhabitant km⁻²) of and the average area covered by legumes for yam in the study area (central Benin). The multinomial logit model is mainly adapted to simulate population dynamics and its characteristics make it possible to predict a value ranging between 0 and 1 (Cimmyt, 1993). The model can be represented by the following equation:

$$E(y_i) = P(y_i) = \left(e^{\alpha + \beta x_i} / 1 + e^{\alpha + \beta x_i} \right), \quad (9)$$

Where:

$P(Y_i)$ is the probability of an individual i adopting a system; $P(Y_i) = 1$ if a system is adopted and 0 otherwise.

E is the exponential function.

Y_i is the dependent variable.

x_i are characteristics of the individual; i is the vector of the independent variables (e.g. age, contact, zone, credit, gender, social status, livestock size, land available, mode of land tenure, household size, labour).

β is a vector of parameters assigned as a coefficient to each independent variable in the model; the sign β allows the interpretation of the results.

2.6. Statistical analysis

Analysis of variance (ANOVA) was applied to yam yield using a randomized block design and a partial nested model with five factors as described in chapter 2.1.

Pearson correlation between variables (yam yield and organic biomass or soil organic matter, organic biomass and soil organic matter) was performed.

3. Results

3.1. Soil properties and rainfall distribution

The initial soil fertility status of the study area was poor. Soil organic matter (SOM) contents were low in all fields, ranging from 0.93 to 2.25%, and the C:N ratio ranged from 8.7 to 11.8. Available P levels were very low and varied from 3 to 20 ppm. The soils were slightly acid. N, P and SOM contents were significantly higher in 0-10 cm than in 10-20 cm depth, except at Gbanlin site for N and SOM. The lowest values of $\text{g kg}^{-1}\text{C}$, $\text{g kg}^{-1}\text{N}$, P (ppm) and organic matter (%) were observed at Gomè (hydromorphic lowland soils) and highest at Akpéro. The soil chemical nutrients were significantly higher in the legumes/maize-yam rotations (TMA and TMM) than in the control rotations (TM control and T0) (Table 1). Calculations of the SOM concentration at the end of the perennial experiment showed that, SOM increased by 0.15% in TMM and TMA.

Table 1: Soil characteristics with the legumes/maize – yam and control rotations 0-10 cm and 10-20 cm soil layers (end of December 2005, 32 farms, Benin)

Soil characteristics	Depth (cm)	T0	TM	TMA	TMM	LSD	SD
C g kg ⁻¹	0-10	7.7c	7.6c	8.2b	8.7a	0.05	0.07
	10-20	7.2c	7.0c	7.8b	8.3a	0.05	0.08
N g kg ⁻¹	0-10	0.6d	0.8c	0.9b	1.0a	0.01	0.01
	10-20	0.7c	0.9b	1.0a	1.0a	0.01	0.01
C : N ratio	0-10	12.0a	10.1b	9.3c	9.0c	0.7	1.0
	10-20	11.1a	8.3b	8.3b	8.3b	0.7	1.0
SOM%	0-10	1.32c	1.31c	1.41b	1.49a	0.08	0.12
	10-20	1.24c	1.21c	1.34b	1.43a	0.09	0.14
P - Bray I (ppm)	0-10	10.21c	11.84b	13.43a	14.35a	1.23	1.88
	10-20	8.75c	10.66b	11.41ab	12.29a	1.36	2.08
K ⁺ cmol kg ⁻¹	0-10	0.33d	0.42c	0.50b	0.54a	0.04	0.06
	10-20	0.27d	0.33c	0.41b	0.45a	0.04	0.06
PH water	0-10	6.0c	6.7b	7.1a	7.0a	0.17	0.26
	10-20	6.0c	6.6b	7.1a	7.0a	0.18	0.27

Means with the same letter within row are not significantly different ($p < 0.05$);

Legend: C g kg⁻¹: soil carbon concentration (g kg⁻¹); N g kg⁻¹: soil nitrogen concentration (g kg⁻¹); OM% (= 1.72× C%): soil organic matter content (%); C:N: Index of biodegradability or ratio of soil carbon to nitrogen; P. ass. Bray (ppm): soil phosphorus; K⁺: soil potassium; LSD: Least square difference at 5%; SD: Standard deviation; TMA: *Aeschynomene histrix* intercropped with maize-yam rotation; TMM: *Mucuna pruriens* intercropped with maize-yam rotation; T0 control 1: 1-year fallow with *Andropogon*-yam rotation; TM control 2: maize-yam rotation

The total crop biomass (aboveground and root biomass) was significantly higher in TMM and TMA than in T0 and TM (Table 2).

Table 2: Recycled crop biomass in legumes/maize-yam and control rotations 0-10 cm and 10-20 cm soil layers (2002-2003 and 2004-2005 cropping seasons, 32 farms, Benin)

Treatment	Recycled areal biomass (t ha ⁻¹)	Recycled root biomass (t ha ⁻¹)	Total recycled biomass (t ha ⁻¹)
2002-2003 cropping systems			
T0	5.4±0.78 c	0.82±0.15 c	6.22±0.92 c
TM	4.47±0.96 d	0.28±0.26 d	4.75±1.21 d
TMA	11.02±0.87 b	2±0.2 b	13.02±1.07 b
TMM	11.5±0.97 a	2.29±0.27 a	13.78±1.23 a
LSD 5%	0.34	0.08	0.42
SD	1.04	0.26	1.29
2004-2005 cropping systems			
T0	5±0.6 c	0.78±0.11 c	5.79±0.7 c
TM	3.93±0.69 d	0.25±0.19 d	4.18±0.87 d
TMA _A	10.34±0.74 b	1.89±0.17 b	12.23±0.9 b
TMM	10.77±0.74 a	2.16±0.21 a	12.93±0.93 a
LSD 5%	0.26	0.07	0.32
SD	0.8	0.2	0.99

Means with the same letter within column are not significantly different ($p < 0.05$); Data are the means \pm SD (Standard deviation);

Legend: LSD: Least square difference at 5%; SD: Standard deviation; TMA: *Aeschynomene histrix* intercropped with maize-yam rotation; TMM: *Mucuna pruriens* intercropped with maize-yam rotation; T0 control 1: 1-year fallow with *Andropogon*-yam rotation; TM control 2: maize-yam rotation

The relationship between SOM at (0-10 and 10-20 cm depths) and the total crop biomass incorporated into the soil was significant in TMM and TMA ($P < 0.01$) in comparison with T0 and TM (Fig. 2).

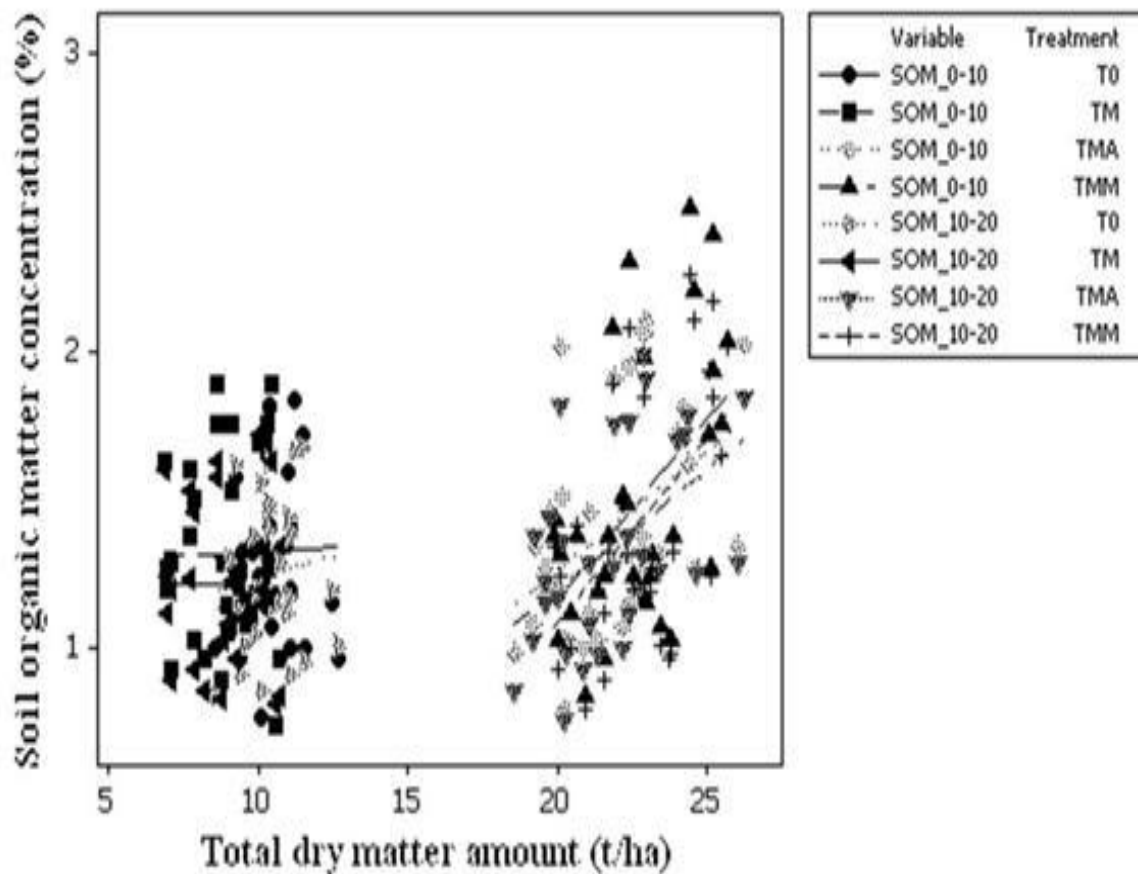


Figure 2: Relationships between soil organic matter at 0-10 and 10-20 cm depths (SOM_0-10 and SOM_10-20) and total organic material dry matter (DM) in the 2002-2003 and 2004-2005 cropping seasons according to treatments

Relationships between soil organic matter on (T0, TM, TMA and TMM) at 0-10 cm depth and total organic material dry matter are as follows: $Y(T0) = 1.22 + 0.009 x$, R^2 ns ; $Y(TM) = 1.34 - 0.003 x$, R^2 ns ; $Y(TMA) = -0.33 + 0.08 x$, $R^2 = 19.5\%$ * ; $Y(TMM) = -0.92 + 0.11 x$, $R^2 = 24.2\%$ *

Relationships between soil organic matter on (T0, TM, TMA and TMM) at 10-20 cm depth and total organic material dry matter are as follows: $Y(T0) = 0.93 + 0.03 x$, R^2 ns ; $Y(TM) = 1.23 - 0.003 x$, R^2 ns ; $Y(TMA) = -0.43 + 0.08 x$, $R^2 = 23.6\%$ * ; $Y(TMM) = -0.92 + 0.11 x$, $R^2 = 26.2\%$ *

* $P < 0.01$, ns: not significant

Predicted soil organic matter (SOM) was estimated for the time horizon 40 years, i.e. the life cycle of a farm household in the study area (Figure 3).

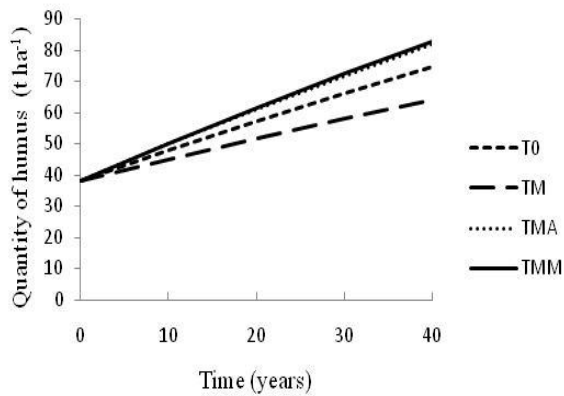


Fig. 3a: $K_2 = 0.005$

$$\begin{aligned} \text{T0: } Y &= -203.27e^{-0.005x} + 241.15; R\text{-sq} = 0.977 \\ \text{TM: } Y &= -144.16e^{-0.005x} + 182.04; R\text{-sq} = 0.984 \\ \text{TMA: } Y &= -242.21e^{-0.005x} + 280.10; R\text{-sq} = 0.973 \\ \text{TMM: } Y &= -247.01e^{-0.005x} + 284.89; R\text{-sq} = 0.972 \end{aligned}$$

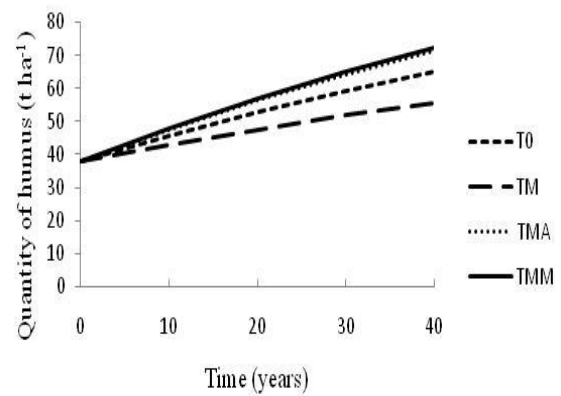


Fig. 3b: $K_2 = 0.01$

$$\begin{aligned} \text{T0: } Y &= -82.69e^{-0.01x} + 120.57; R\text{-sq} = 0.973 \\ \text{TM: } Y &= -53.14e^{-0.01x} + 91.02; R\text{-sq} = 0.981 \\ \text{TMA: } Y &= -102.17e^{-0.01x} + 140.05; R\text{-sq} = 0.969 \\ \text{TMM: } Y &= -104.56e^{-0.01x} + 142.45; R\text{-sq} = 0.968 \end{aligned}$$

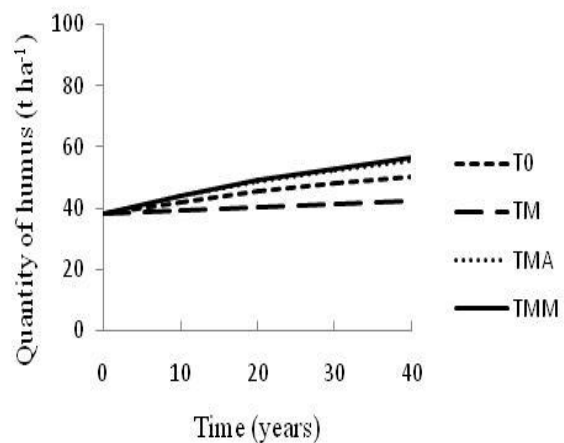


Fig. 3c: $K_2 = 0.02$

$$\begin{aligned} \text{T0: } Y &= -22.41e^{-0.02x} + 60.29; R\text{-sq} = 0.964 \\ \text{TM: } Y &= -7.63e^{-0.02x} + 45.51; R\text{-sq} = 0.974 \\ \text{TMA: } Y &= -32.14e^{-0.02x} + 70.02; R\text{-sq} = 0.958 \\ \text{TMM: } Y &= -33.34e^{-0.02x} + 71.22; R\text{-sq} = 0.957 \end{aligned}$$

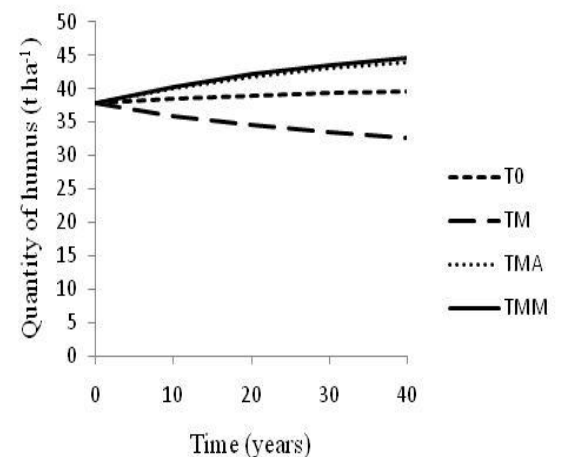


Fig. 3d: $K_2 = 0.03$

$$\begin{aligned} \text{T0: } Y &= -2.31e^{-0.03x} + 40.19; R\text{-sq} = 0.952 \\ \text{TM: } Y &= 7.54e^{-0.03x} + 30.34; R\text{-sq} = 0.964 \\ \text{TMA: } Y &= -8.80e^{-0.03x} + 46.68; R\text{-sq} = 0.945 \\ \text{TMM: } Y &= -9.60e^{-0.03x} + 47.48; R\text{-sq} = 0.944 \end{aligned}$$

Figure 3. Estimated humus balance significantly increased in TMA: *Aeschynomene histrix* intercropped with maize-yam rotation; TMM: *Mucuna pruriens* intercropped with maize-yam rotation compared with the control rotations (T0 control 1: 1-year fallow with *A. gayanus*-yam rotation; T_M control 2: maize-yam rotation) (4 sites, 32 farmers, Benin): Fig 1a: $K_2 = 0.005$; Fig. 1b: $K_2 = 0.01$; Fig. 1c: $K_2 = 0.02$; Fig. 1d: $K_2 = 0.03$; Legend: R-sq = R square

At the beginning of the experiment (2002), the average amount of humus was 37.88 t ha⁻¹. The amount of humus increased significantly with TMM and TMA ranged (44.72 to 92.52 t ha⁻¹) in comparison with T0 and TM (32.02 to 69.77 t ha⁻¹). This resulted in a total net humic balance ranging from 6.15 to 44.78 t ha⁻¹ in TMM and TMA versus -5.27 to 36.85 t ha⁻¹ in T0 and TM (Table 3).

Table 3: Net humus balance over a 40-year period (t ha⁻¹) in legumes/maize-yam and control rotations according to predicted mineralization coefficients (0-10 cm and 10-20 cm soil layers, 32 farms, Benin)

Treatment	Net humus balance over the 40-year period (t ha ⁻¹)			
	Predicted mineralization coefficients			
	0.005	0.01	0.02	0.03
T0	36.85±3.49 b	27.26±3.18 b	12.34±2.65 b	1.61±2.24 b
TM	26.13±4.13 c	17.52±3.75 c	4.20±3.14 c	-5.27±2.65 c
TMA	43.91±2.81 a	33.68±2.55 a	17.70±2.13 a	6.15±1.8 a
TMM	44.78±2.98 a	34.47±2.71 a	18.36±2.26 a	6.71±1.92 a
LSD 5%	1.28	1.16	0.97	0.82
SD	3.92	3.56	2.97	2.52

Means with the same letter within column are not significantly different ($p < 0.05$); Data are the means \pm SD (Standard deviation).

Legend: LSD: Least square difference at 5%; TMA: *Aeschynomene histrix* intercropped with maize-yam rotation; TMM: *Mucuna pruriens* intercropped with maize-yam rotation; T0 control 1: 1-year fallow with *Andropogon*-yam rotation; TM control 2: maize-yam rotation

The ANOVA partial nested model showed that Nutrients balances of nitrogen, phosphorus and potassium differed significantly depending on the factors Treatment ($P < 0.05$), Farmer ($P < 0.001$), and Replication ($P < 0.001$). The factor Site was not significant for nutrient balance. Year \times Treatment ($P < 0.001$), and Year \times Site ($P < 0.001$) interactions were significant (Table 4).

Table 4: Main factors effects of nutrients balance for yam-based cropping systems with legumes during the 2002-2003 and 2004-2005 cropping seasons in four villages in Benin

Source	DF	N		P		K	
		F	P	F	P	F	P
Farmer(Site)	28	3.5	0.000	5.3	0.000	5.3	0.000
Year	1	6.0	0.078	0.32	0.596	0.1	0.811
Replicate	3	604.5	0.000	95.1	0.000	90.7	0.000
Site	3	0.1	0.963	5.0	0.019	0.9	0.518
Treatment	3	105.4	0.000	17.4	0.000	7.5	0.042
Site×Treatment	9	8.8	0.000	13.2	0.000	3.1	0.042
Treatment×Farmer(Site)	84	5.6	0.000	1.3	0.047	1.3	0.058
Year×Treatment	3	2.1	0.173	5.7	0.014	16.4	0.001
Year×Site	3	8.8	0.005	5.3	0.022	24.6	0.000
Year×Site×Treatment	9	6.9	0.000	12.3	0.000	2.0	0.038
Error		877		877		877	
Adjusted R-square (%)		97.4		94.5		63.2	

Average amount of nutrient balances were significant and varied from -71.9 to -38 kg N ha⁻¹, -2.1 to 3.4 kg P ha⁻¹ and -12.1 to -2.7 kg K ha⁻¹ in controls (T0, TM) versus from 33.0 to 44.4 kg N ha⁻¹, 10.1 to 11.5 kg P ha⁻¹ and 4.1 to 9 kg K ha⁻¹ in yam-based cropping systems with legumes (TMA, TMM) (Table 5).

Table 5: Nutrient balance of nitrogen, phosphorus and potassium (kg ha⁻¹) in legumes/maize and control rotations in four villages in Benin.

Treatment	2002-2003 cropping season			2004-2005 cropping season		
	N	P	K	N	P	K
T0	-71.9 d	-0.9 d	-12.1 b	-61.4 d	-2.1 c	-9.8 d
TM	-53 c	3.4 c	-12.7 b	-38 c	6.0 b	-2.7 c
TMA	26.9 b	10.1 b	9.0 a	33.0 b	11.2 a	4.1 b
TMM	35.8 a	11.5 a	8.8 a	44.4 a	11.4 a	6.5 a
LSD 5%	4.38	0.88	2.61	4.41	0.73	1.92
SD	13.44	2.72	8.02	13.53	2.24	5.91

a, b, c, d: Means with different superscripts in the same column differ significantly ($P < 0.05$); F-test for differences among means was always significant at $p < 0.001$

Legend: LSD: Least square difference at 5%; SD: Standard deviation; TMA: *Aeschynomene histrix* intercropped with maize-yam rotation; TMM: *Mucuna pruriens* intercropped with maize-yam rotation; T0 control 1: 1-year fallow with *Andropogon*-yam rotation; TM control 2: maize-yam rotation

Yam based cropping systems with legumes (TMA, TMM) improved significantly the N, P, and K balances. There were differences among treatment in nutrient INPUTs, and they were caused by differences in the amounts of organic matter that had been incorporated in the soil. The amount of nutrients accumulated varied from 23.3 to 270.3 kg N ha⁻¹, 6 to 34.4 kg P ha⁻¹ and 45.7 to 116.6 kg K ha⁻¹ in yam based cropping systems with legumes (TMA, TMM) versus from 23.3 to 101.9 kg N ha⁻¹, 2.7 to 18.6 kg P ha⁻¹ and 15.6.7 to 55.3 kg K ha⁻¹ in controls (T0, TM). The input by atmospheric deposition was estimated at 5.2 kg N ha⁻¹, 0.14 kg P ha⁻¹, and 4.2 kg K ha⁻¹. Differences in nutrient OUTPUTs among treatments were caused mainly by differences in measured yields and nutrient contents.

Farmers' effect on soil eroded was significantly different ($P < 0.000$). The interaction Treatment×Farmer (Site) was significant ($P < 0.000$) (Table 6).

Table 6: ANOVA, partial nested model of the effect of the four treatments on soil eroded in yam based cropping systems (2002-2003 and 2004-2005, 4 sites, 32 farmers, Benin)

Source	DF	F	P
Farmer(Site)	28	263.4	0.000
Year	1	2.9	0.167
Replicate	3	83.2	0.000
Site	3	6.0	0.081
Treatment	3	0.6	0.672
Site×Treatment	9	0.4	0.886
Treatment×Farmer(Site)	84	2.7	0.000
Year×Treatment	3	2.0	0.180
Year×Site	3	3.4	0.065
Year×Site×Treatment	9	8924.6	0.000
Error		877	
Adjusted R-square (%)		99.9	

Legend: DF: Degree of freedom; F: Fisher's test; P: Fisher's probability test

Soil eroded amounts varied from 5.1 to 23.6 t ha⁻¹ year⁻¹. Considering the significant effect of Treatment×Farmer (Site) interactions, soil and nutrient erosion in maize (TM) or in pattern crops legumes/maize (TMA, TMM) was significantly different in comparison with control rotation as *Andropogon gayanus* (T0). Soil eroded in T0 was significantly higher (12.2 t ha⁻¹ year⁻¹) than in the others (around 10.3 t ha⁻¹ year⁻¹). The calculated losses of N, P and K

by erosion varied from 3.8 to 18.0 kg N ha⁻¹, 0.6 to 2.7 kg P ha⁻¹ and 1.9 to 8.4 K ha⁻¹ per year for both yam-based cropping systems with legumes and controls. Nutrients (N, P, and K) eroded in T0 were significantly higher ranged (9.3, 1.4, and 4.7 kg ha⁻¹ year⁻¹) respectively than in (TMA, TMM, and TM) with an average of eroded N, P and K ranged (7.8, 1.1, and 3.9 kg ha⁻¹ year⁻¹) (Table 7).

Table 7: Soil and nutrient erosion in legumes/maize and control rotations in four villages in Benin

Treatment	Soil eroded (t ha ⁻¹ year ⁻¹)	N eroded (kg ha ⁻¹ year ⁻¹)	P eroded (kg ha ⁻¹ year ⁻¹)	K eroded (kg ha ⁻¹ year ⁻¹)
T0	12.2 a	9.3 a	1.4 a	4.7 a
TM	10 b	7.6 b	1.1 b	3.8 b
TMA	10.6 b	8.0 b	1.2 b	4.0 b
TMM	10.4 b	7.9 b	1.2 b	4.0 b
LSD 5%	1.11	0.84	0.13	0.42
SD	4.82	3.66	0.55	1.84

a, b, c, d: Means with different superscripts in the same column differ significantly ($P < 0.05$); F-test for differences among means was always significant at $p < 0.001$

Legend: LSD: Least square difference at 5%; SD: Standard deviation; TMA: *Aeschynomene histrix* intercropped with maize-yam rotation; TMM: *Mucuna pruriens* intercropped with maize-yam rotation; T0 control 1: 1-year fallow with *Andropogon*-yam rotation; TM control 2: maize-yam rotation

Leaching varied from 38 to 91.4 kg N ha⁻¹, and from 9.9 to 76.7 kg K ha⁻¹.

3.2. Yam and maize yields

TMA and TMM had similar yam yields that were significantly higher than in the traditional cropping systems T0 and TM (Table 8). TMA and TMM yield ranged from an average of 14.52 t ha⁻¹ in 2003 to 16.02 t ha⁻¹ in 2005, whereas T_M had the significantly lowest yam yield regardless of the year: 7.67 t ha⁻¹ in 2003 and 6.04 t ha⁻¹ in 2005.

Table 8: Yam and maize yields as affected by the legumes/maize – yam rotations (TMA: *Aeschynomene histrix* intercropped with maize-yam rotation; TMM: *Mucuna pruriens* intercropped with maize-yam rotation) versus the two control rotations (T0 control 1: 1-year *Andropogon* fallow-yam rotation; TM control 2: maize-yam rotation) (4 sites, 32 farmers, Benin)

Treatment	Maize yield (t ha ⁻¹)		Yam yield (t ha ⁻¹)	
	2002	2004	2003	2005
T0	-	-	10.19 ± 1.23 b	8.68 ± 1.26 b
TM	1.89 ± 0.19 a	1.71 ± 0.12 a	7.67 ± 1.33 c	6.04 ± 1.46 c
TMA	1.87 ± 0.09 a	1.50 ± 0.08 b	14.40 ± 1.43 a	16.0 ± 1.61 a
TMM	1.81 ± 0.09 b	1.45 ± 0.13 c	14.65 ± 1.44 a	16.04 ± 1.46 a
LSD 5%	0.05	0.04	1.03	1.1
SD	0.16	0.13	1.57	1.68

Means with the same letter within column are not significantly different ($p < 0.05$)

Data are the means ± SD (Standard deviation);

Legend: LSD: Least square difference at 5%; SD: Standard deviation

Maize yield differed significantly depending on the Treatment ($P < 0.001$), TM had the highest maize yield (1.89 and 1.71 t ha⁻¹) in 2002 and 2004 respectively whereas TMM with *Mucuna* had the lowest (1.81 and 1.45 t ha⁻¹). Maize yields decreased from the 2002 to the 2004 cropping season (Table 8).

The ANOVA partial nested model showed that yam yield differed significantly depending on the factors Treatment ($P < 0.05$), Farmer ($P < 0.001$), and Replication ($P < 0.001$). The factor Site was not significant for yam yields. Year × Treatment ($P < 0.01$), and Year × Site ($P < 0.001$) interactions were significant (Table 9).

Table 9: ANOVA, partial nested model of the effect of the four treatments on logarithmic transformed values of yields of “Kokoro” yam (*Dioscorea rotundata*) (2002-2003 and 2004-2005, 4 sites, 32 farmers, Benin)

Source	DF	F	P
Farmer (Site)	28	14.66	0.000
Year	1	0.06	0.818
Replicate	3	12.96	0.000
Site	3	0.51	0.698
Treatment	3	18.91	0.020
Site × Treatment	9	0.64	0.736
Treatment × Farmer (site)	84	0.7	0.978
Year × Treatment	3	12.34	0.002
Year × Site	3	45	0.000
Year × Site × Treatment	9	1.85	0.056
Error	877		
Adjusted R-square (%)	66.30		

Legend: DF: Degree of freedom; F: Fisher's test; P: Fisher's probability test

Interaction plots for “Kokoro” yam yield differed significantly according to the treatment and the year or the site and the year (Figs. 4 and 5).

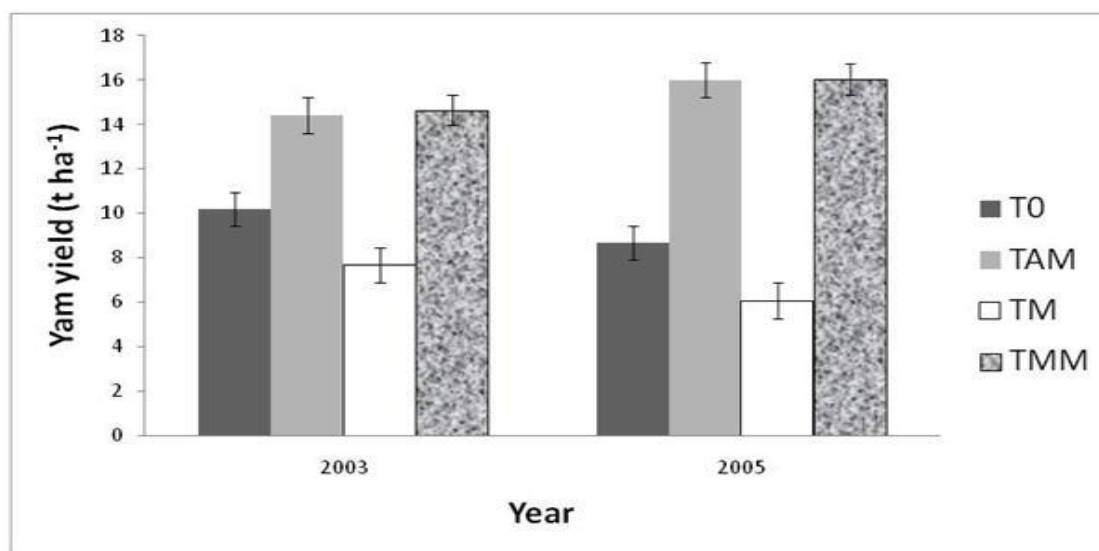


Figure 4: Interaction plots for “Kokoro” yam yield according to the treatment and the year

Légend: TMA: *Aeschynomene histrix* intercropped with maize-yam rotation; TMM: *Mucuna pruriens* intercropped with maize-yam rotation; T0 control 1: 1-year fallow with *Andropogon*-yam rotation; TM control 2: maize-yam rotation

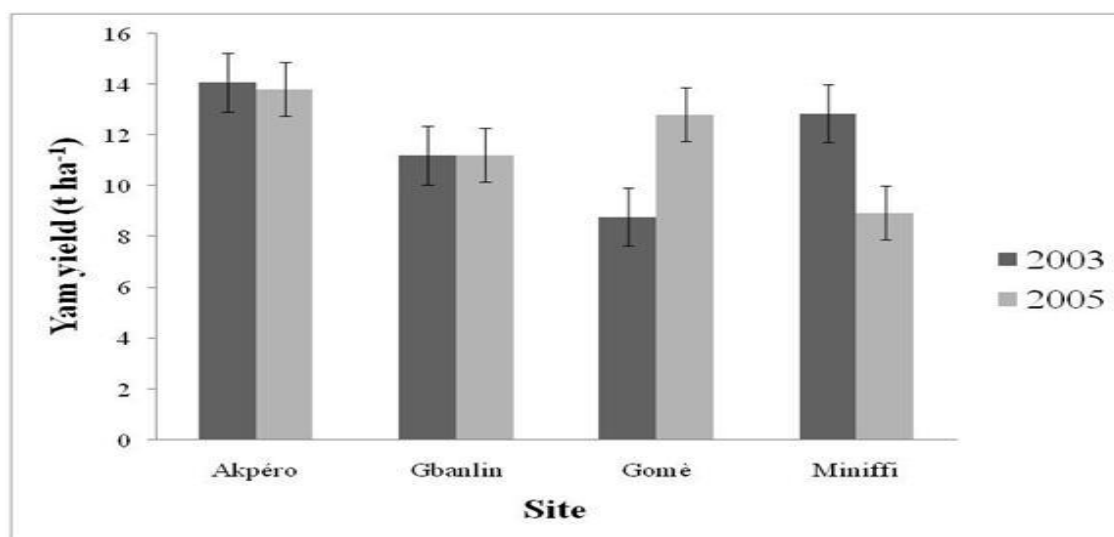


Figure 5: Interaction plots for "Kokoro" yam yield according to the site and the year (all treatments combined)

The relationship between yam yields and SOM was significantly higher on (TMA and TMM) at 0-10 cm depth compared with the traditional rotations (T0 and TM) ($P < 0.01$). No relationship between yam yields and SOM was observed at 10-20 cm depth (Fig. 6).

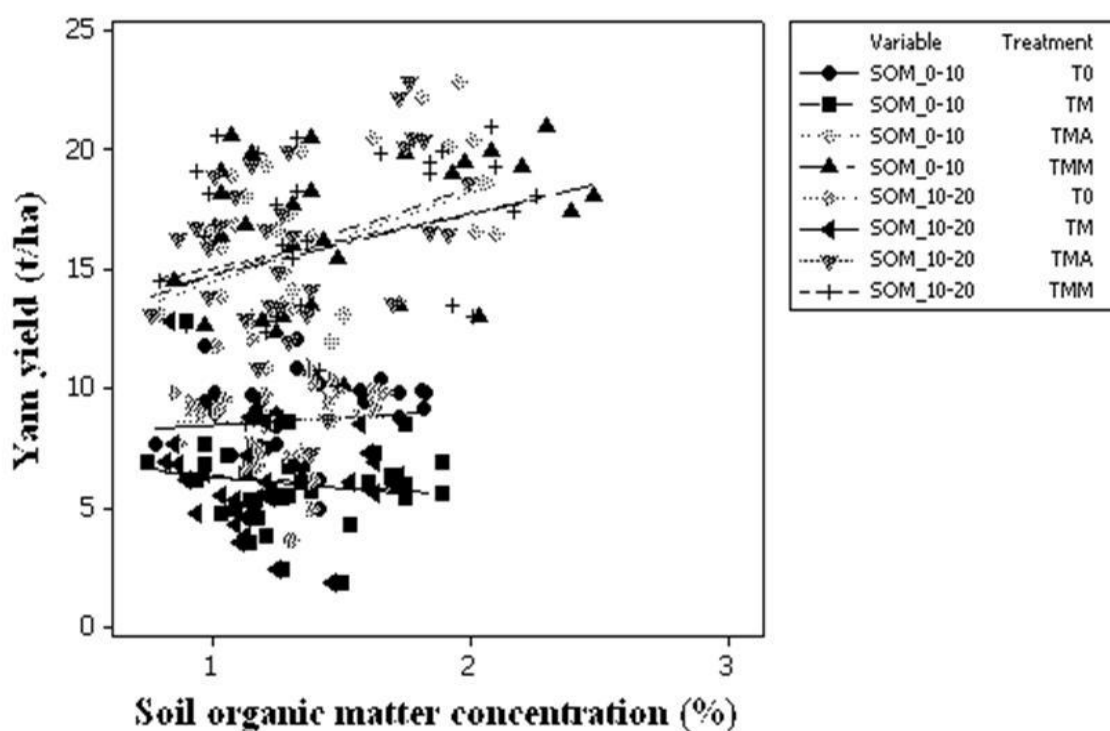


Figure 6: Relationships between "Kokoro" yam yield and soil organic matter according to treatments at 0-10 and 10-20 cm depths.

Relationships between "Kokoro" yam yield and soil organic matter on treatments (T0, TM, TMA and TMM) at 0-10 cm depth are as follows: $Y (T0) = 7.9 + 0.6 x$, $R^2 = 0.9\%$ ns ; $Y (TM) = 7.3 - 0.9 x$, $R^2 = 1.9\%$ ns ; $Y (TMA) = 10.8 + 3.7x$, $R^2 = 13.4\%$ * ; $Y (TMM) = 12.2 + 2.5 x$, $R^2 = 12.9\%$ *

Relationships between "Kokoro" yam yield and soil organic matter on treatments (T0, TM, TMA and TMM) at 10-20 cm depth are as follows: $Y (T0) = 8.3 + 0.6 x$, $R^2 = 0.2\%$ ns ; $Y (TM) = 7.2 - x$, $R^2 = 1.7\%$ ns ; $Y (TMA) = 11.1 + 3.7x$, $R^2 = 11.2\%$ ns ; $Y (TMM) = 12.8 + 2.3 x$, $R^2 = 6.9\%$ ns

*P < 0.01, ns: not significant.

3.3. Intensity of the adoption of technologies

Analysis by gender on the adoption of the technologies in central Benin revealed that women with a negative land status show more interest in herbaceous legumes than men. *Mucuna* is more appreciated and adopted than *Aeschynomene*. In fact, 48% (26/54) and 24% (13/54) women have adopted rotations with *Mucuna* and *Aeschynomene* respectively while 31% (77/252) and 21% (54/252) of the same rotations have been adopted by men (Table 10).

Table 10: Econometric model of the intensity of adoption of yam-based systems with *Mucuna pruriens* var *utilis* and *Aeschynomene histrix* in central Benin

	<i>Mucuna</i> rotation (TMM)				<i>Aeschynomene</i> rotation (TMA)		
	Sample size	Nb of adopters	% of adopters	Intensity of adoption (%)	Nb of adopters	% of adopters	Intensity of adoption (%)
Women	54	26	48	1.5	13	24	0.8
Men	252	77	31	4.5	54	21	3.2
Total	306	103	34	6	67	22	4
Log-Prob.	-143.08				-144.01		
χ^2	104.74***				44.01***		
% of pred	77				79.74		

Legend: ***p<0.01 represent significant level at 1%; Log-P : Log-probabilities; χ^2 : Chi 2; % of pred. : % of prediction ; Nb of adopters: Number of adopters

The intensity of the adoption of the technologies in central Benin still remains low. Intensity of the adoption levels are 4% and 6% for rotations with *Aeschynomene* and *Mucuna* respectively.

4. Discussion

4.1. Effects of site and year: contribution of rainfall

Rainfall variability affects yam production, as a delayed onset of the rainy season can be prejudicial to crop growth and yam yield. Yam requires a lot of water especially after crop germination and then between the 14th and 20th weeks of vegetation (Dansi *et al.* 2003). Yield mainly depends on the effective duration of the transition to autotrophy, i.e. the stage of vegetative development of the crop without the supply of reserves from the mother tuber (Degras, 1986). The beginning of autotrophy, which occurs when real leaves grow, is determined by the beginning of the rainy season.

In our study, rainfall distribution varied among years and sites, particularly from January to May, i.e. 20 weeks after yam was planted. But in 2005, even though there was a drought, the favorable early rainfall distribution after yam plantation could explain why in 2005 the yield was similar to or better than that in 2003 in three sites (Akpéro, Gbanlin, and Gomè). An alternative explanation is that the crop may have demonstrated better water use efficiency because 2005 was dry. In Gomè the yield was much higher in the dry year than in the wet year. In fact, in Gomè there are more poorly drained soils (lowland) among the fields selected for the experiment. While Miniffi (in more drained soil), the yield was dropped drastically in 2005 (Figure 5). Mineral nutrition might thus have improved stomata regulation and metabolic efficiency as higher nutrient availability can enhance the uptake of nutrients; soil moisture is low (Payne *et al.*, 1992). Furthermore, residues recycled and accumulated in 2002 and then in 2004 could have resulted in a combined beneficial effect of water, nutrient use and plant growth in 2005.

4.2. Effects of cropping systems on yam and maize yields

In rotations with a fertilized herbaceous legumes intercropped with maize before the yam crop, we obtained yam yields of around 15 t ha⁻¹ (fresh matter) whereas in rotations with fertilized maize or with the 1-year fallow planted with *A. gayanus* before yam, yam yields were lower, less than 9 t ha⁻¹. Furthermore, in our on-farm study, mineral fertilization applied on maize (100 kg NPK + 50 kg urea ha⁻¹) appeared to have no beneficial effect on yam yield, as the fertilized maize-yam rotation had the lowest yam yields, even lower than those of 1-year fallow with *A. gayanus*-yam rotation. This could be due to the leaching. In addition, the amount of N removed by the maize grains was similar to the amount of N supplied with the

fertilizer (100 kg NPK (14-23-14 + 50 kg urea equals to approximately 40 kg N only) (Maliki *et al.*, 2012).

These results agree with those of Carsky *et al.* (1998, 2001), who obtained a yield of approximately 10 t ha⁻¹ for yam cultivated after deforestation or long fallow, followed by a decreasing yield in subsequent years. In the savannah zone of Nigeria, Watson and Goldsworthy (1964) estimated a yam yield of 11 t ha⁻¹ after a 3 or 4-year fallow and less than 6 t ha⁻¹ after 1 or 2-year fallow.

However, in fertilized herbaceous legumes intercropped with maize before the yam crop, there was a significant decrease in maize yield compared to the simple maize-yam rotation (TM), which may be due to competition for nutrients and light.

These observations underline the importance of soil organic matter content for yam yield. In central Côte d'Ivoire, Diby *et al.* (2009) reported the influence of soil organic matter on yam growth and tuber production in forest (high organic fertility soil: 14.4% C at 0-10 cm and 9.75% C at 10-20 cm) and savannah (7.49% and 5.43% C). These authors also showed that the low yields obtained on soils with low organic matter content were not compensated by supplying mineral fertilizer. In Benin, Gbedolo (1986) reported that experimentation with mineral fertilizers rarely produced significant results, and that N application resulted in tubers of low organoleptic quality. In contrast, in Trinidad, Chapman (1965) obtained a 30% increase in tuber yield when N application was delayed until three months after planting. In Benin, Srivastava *et al.* (2010) reported that yam yield increased when crop residues and manure were applied, but only when the rainfall amount and distribution was adequate. Using the EPIC (Environmental Policy Integrated Climate) crop growth model, Srivastava and Gaiser (2010) showed yield depended on the species of yam and on rainfall, and also on the sensitivity of yam yields to fallows. In a 2 year study, Obigbesan *et al.* (1977) obtained positive yield responses to K fertilization in three species of yam in West Nigeria. Diby *et al.* (2004) reported the influence of soil properties on yam growth and tuber production in Ivory Coast. Two species (*D. alata*, *D. cayenensis-rotundata*) were grown in two agro-ecological zones (forest and savannah) in Ivory Coast. Fertilizer application increased dry matter (DM) production of both species in the savannah site only. A good agreement between measured and simulated DM was noticed only for *D. alata* in the forest zone site, and for all other treatments in both sites the DM pattern was similar and with overestimations. The overestimations were attributed to the differences in soil fertility (e.g. higher pH, higher clay and organic matter in forest) between zones and to genetic differences between species. In addition, several works showed positive effects of mineral fertilizers on yam yield (Djokoto

and Stephens, 1961; Horn *et al.*, 2005 quoted by Cornet *et al.*, 2005). Therefore, the reasons of contrasting results of this experiment with other experiments regarding the effect of organic and inorganic fertilizer on yam in the literature were related to the boundary conditions (climate, agro-ecological zone, soil type, soil organic, C level, cultivation history, and crop management practices).

4.3. Impact of cropping systems on changes in soil organic matter

Assessing SOM concentration (unstable fraction of humus) in yam-based production systems is indispensable to judge the soil fertility quality and its effect on yield. In our study, these assessments cover short-term changes in SOM with the contribution of organic material used in rotation systems. Therefore, differences in total SOM increase between the treatments were likely related to the total amount of biomass (aboveground and root biomass) in intercropping of herbaceous legumes (fermentable green manure) and lignified maize stover which favors the formation of SOM (Fig. 2). Approximately 26 t ha⁻¹ of organic materials were produced over the 4-year period and restituted to the soil in yam based-cropping systems with legumes (TMA or TMM). This increased SOM by 0.15% in the top 20 cm layer of soil (Table 1). Furthermore, these differences in total SOM increased significantly yam yields on TMA or TMM in comparison with (T0 and TM) (Fig. 6).

Calculations of the humus balance for the 40-year period under yam-based cropping systems showed that SOM increased and ranged from 0.25 to 1.80% in TMM and TMA and from 0.21 to 1.47% in T0 and TM. For example, soil humus in TMM with K₂ (0.005) was estimated at 44.78 ha⁻¹. As approximately 25 t ha⁻¹ of humus is needed to increase SOM by 1% in the top 20 cm layer of soil (Quenum and *al.*, 2004), according to the prediction of soil humus, SOM should increase by approximately 1.8% (44.78/25). This shows that around 270 tons (TMM and TMA) versus 110 t ha⁻¹ (T0 and TM) of organic materials were produced over the 40-year period and restituted to the soil in yam based-cropping systems. Taking into account the average level of the initial soil organic matter, the soil organic matter concentration over the 40-year period should vary from 1.8 to 3.4% in yam based cropping systems with legumes versus 1.3 to 3.0% in traditional systems. However, it is accepted that a rate of 1.5% is the theoretical critical limit, below which the fertility decreases rapidly. It is often desirable to seek to maintain a minimum rate of 2.5% in general and even 3.5-4% in heavy soils (Doucet, 2006). The results of our study in yam-based cropping systems with legumes show a range of rates of SOM in adequacy with the standard required. In General, a

rate of 4 to 8% of organic matter corresponds to good productivity and good ability of mineralization. However, high organic matter content may be indicative of poor growing conditions if they are associated with poor drainage conditions. In addition, a high level of organic matter can induce too high water retention and the development of certain diseases (CRAAQ, 2003).

Modeling the humus balance makes it possible to estimate changes in SOM under the crop residues and losses related to microbial mineralization of SOM. However, many factors can influence the calculations, particularly humification coefficients (K_1), and mineralization (K_2) of the humus (Soltner, 1994; CRAAQ, 2003). Limits are related to the capacity to obtain valid information on required agronomic parameters such as coefficients of humification of the organic materials supplied to the soil and mineralization of the humus. The predicted humus balance is a good agricultural management tool for researchers, farmers or decision makers as it can help choose the most appropriate rotation and fertilization practices.

Our observations are in agreement with those of Bolinder (2003) who reported that cropping systems and organic manures have the most influence on the SOM. These results are in accordance with those of Snapp *et al.* (1998) who reported that approximately 7 t ha⁻¹ year⁻¹ dry matter of low quality residues (roots, stems) or 10 t ha⁻¹ year⁻¹ of high quality residues (green manure leaves) are required to maintain a 1.0% organic C level in a sandy loam soil in the sub-humid tropics (assuming a 0.05 fraction decomposed per year). The authors argued that, it is difficult to produce an adequate amount of organic material under smallholder farm conditions to build or maintain soil organic matter (SOM). Azontondé (1993) showed that the treatment which changes *Mucuna* every year in association with maize raises the organic matter rate (0.6 to 2.0 %) within five years.

Therefore, the SOM enrichment could be dependent to the boundary conditions (soil type, cropping systems, land use, climate, and cultivation history).

4.4. Herbaceous legumes in yam-based rotation cropping systems: contribution of N, P and K

Nutrient balances were negative for the control rotations (T0, TM), except the phosphorus balance on TM that could be related to the inorganic fertilizer P applied on maize. Treatments TMA and TMM had the largest additions of available nutrients. In our study, soil chemical analysis showed that the soil was deficient in N, P and K. Many studies focusing on these elements conclude that there is an indisputable need to correct the lack of N and P in the

soil in Africa (Azontondé, 1993; Gaiser, 1999). Rotations with *M. pruriens* and *A. histrix* represented a source of easily available N, P, and K for the yam crop which could be related to their faster decomposition and nutrient release, compared with the slower release of nutrients by poorer quality materials such as maize stover and *A. gayanus* grass. In Ghana, studying the effect of cropping sequences with cassava and legume crops, Adjei-Nsiah *et al.* (2007) indicated that only 30% of *M. pruriens* litter remained six weeks after incorporation of the biomass. Van Noordwijk *et al.* (1995) and Triomphe (1996), who studied the traditional *M. pruriens*-maize rotation in Honduras, estimated that 83% of nitrogen produced by a mulch of *M. pruriens* was available for the following maize crop. They also observed that available P remained practically constant, with 15 to 20 ppm in the surface horizon in spite of P exports by maize. Triomphe (1996) concluded that the practice of continued rotation with *M. pruriens* and maize prevented soil N depletion for at least 15 years.

Our results showed that legumes improved soil P (Table 1). Legumes fallows with *M. pruriens*, are known especially for improving the quantity of available P fractions in the soil for subsequent crops (Salako and Tian, 2003). Nevertheless, it depends on the inherent P levels in the soils. *M. pruriens* root exudates could solubilize P increasing its availability. In the study of Nziguheba *et al.* (1998), organic materials have also been found to reduce P sorption capacity of soils and increase crop yields in P limiting soils.

The soil K concentrations were improved in our study (Table 1). Igué (2000) showed the soil K concentration of $0.82 \text{ cmol kg}^{-1}$ in the 0-20 cm soil layer and decreased significantly with cultivation. The rate of decline was about $0.023\text{-}0.054 \text{ cmol kg}^{-1} \text{ year}^{-1}$ in the 0-20 cm soil layer Igué (2000).

4.5. Impact of yam-based cropping with herbaceous legumes on soil erosion

The higher soil erosion rates on yam mounds fields in our study calculated with the universal soil loss equation (USLE) were observed for different systems (Wischmeier and Smith, 1978). In our study, soil and nutrient erosion in *Andropogon gayanus* rotation was significantly higher than in pattern crops legumes/maize or in maize. This could be explained by the more lignified straw and root biomass of maize with moderate decomposition rates limiting soil losses. Our results fits with those of Hiepe and Jungle (2003) in the study area that show long-term average of $20\text{--}27 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ soil loss by erosion. In general, the higher soil erosion rates were observed on yam mounds fields in comparison with other cropping systems. This can be explained as a consequence of the mechanical destruction, during the ridging, of the soil structure and soil cover that shades the soil: biological activity (earthworm

density) decreases and therefore reduces the macroporosity. The induced lower permeability of the soil surface causes higher surface runoff and soil erosion. Furthermore, the selective loss of finer soil particles leads to higher topsoil gravel content delivered by the B-horizon, lower organic carbon content and a deterioration of the soil structure in the first horizon (Hiepe and Jungle, 2003; Junge, 2004; Giertz *et al.*, 2005). Erosion increases where there is no plant cover, but where permanent and undisturbed plant cover exist, erosion is more or less gradual (Janick, 1982). This also affects soil productivity through loss of nutrients, soil water holding capacity, soil structure and infiltration rate (Adeleye *et al.*, 2003). We thus suggest both mulching and biomass incorporation into the soil in yam based-cropping systems with mounds. Half or three-quarters of biomass could be manually incorporated into the soil in October-November during ridging, and the remaining biomass could be left on the soil surface as mulch. Yam production with zero tillage under mulch covering, the forage legume-crop-livestock integration within fence systems could be also alternatives (Cornet *et al.*, 2009).

4.7. Intensity of the adoption of technologies

Intensity of the adoption levels are 4% and 6% for rotations with *Aeschynomene* and *Mucuna* respectively. Indeed, we are currently witnessing in the study area further the development of traditional cleared forest fallows and shifting cultivation practices and, little by little, the village areas will be totally cleared, by successive halos expansion and spin-off (Floquet *et al.*, 2012). When forest availability decreased, some farmers specialize and adapt to changes in environmental conditions, in particular through the descent in the lowland areas correlated with varietal adaptations as early maturing varieties (Floquet *et al.*, 2012). These modifications, which are also forms of increasing the use of space is scarce, seem for the moment being preferred to sedentary yam-based cropping systems, despite the relative performance of the intensified technologies (Maliki *et al.*, 2012). The results show that farmers take into account rather the opportunity cost of labor resources to decide whether to invest them or not in new technologies. If, for example, he realizes that the additional work allocated to maintain the yam-based systems with legumes can produce higher efficiencies if it invests rather to develop another cropping system, he did not hesitate to do. This is in accordance with the theory of Boserup (1965) and Mulder (2000). This is precisely the reason why farmers are reluctant to pass extensive systems in intensive systems including organic material inputs. Indeed, Boserup (1965) reported that as long as land reserves are available, it would be difficult to farmers to accept intensive systems with organic inputs because they are

aware that this will result in a decrease in the productivity of their main factor of production (labor).

4.6. Implication for conservation

Our findings will help farmers to save part of their financial resources used for pruning clearing traditional wooded perennial fallows, forests and assure the time economy with a positive impact on soil productivity. In addition, the application will allow to natural resources better preserved, agricultural production to be diversified, plant biodiversity to be better conserved, access of smallholders to land resources to be improved, as well as their capacity to manage these resources. In minimizing slash-and-burn and shifting cultivation practices by sedentary cropping systems, these improved rotations with legumes could contribute to reduce greenhouse gas emissions in land or soils related processes, or increase soil capacity to act as a carbon sink.

5. Conclusion

We showed the benefit of including herbaceous legumes as an intercrop with maize which precedes the main crop of yam in the 2-year rotations practiced today in Central Benin. The herbaceous legumes studied were *Mucuna pruriens* and *Aeschynomene histrix*. Fallows improved more soil organic matter than maize crop residues, and intercropped herbaceous legume/maize fallow than fallow of *Andropogon*. In fact, intercropping herbaceous legumes with maize in rotations with yam significantly improved yam yields to about 15 t ha⁻¹ (fresh matter), whereas in rotations with maize or 1-year fallow with *A. gayanus* yam yields were less than 9 t ha⁻¹. The maize-yam rotation had the lowest yam yields, about 7 t ha⁻¹. The soil organic matter increased, by 0.15% in the top 20 cm layer of soil with improved rotations over the 4-year period of the experiment. The soil organic matter concentration over the 40-year period should vary from 1.8 to 3.4% in yam based cropping systems with legumes versus 1.3 to 3.0% in traditional systems. Soil erosion rates using the universal soil loss equation (USLE) show amounts ranging from 5.1 to 23.6 t ha⁻¹ year⁻¹. Soil erosion in *Andropogon gayanus* rotation (12.2 t ha⁻¹ year⁻¹) was significantly higher than in maize or in pattern crops legumes/maize (around 10.3 t ha⁻¹ year⁻¹). In addition, nutrients (N, P, and K) eroded in *Andropogon gayanus* were significantly higher (9.3, 1.4, and 4.7 kg ha⁻¹ year⁻¹) than in the other treatments ranged (7.8, 1.1, and 3.9 kg ha⁻¹ year⁻¹) respectively. Including herbaceous legumes in rotations in yam-based cropping systems improves soil macronutrients and could

thus contribute to sustainable yam production. Intensity of adoption using multinomial model still remains low (4 and 6%) for rotations with *Aeschynomene* and *Mucuna* respectively. Soil organic matter assessment in yam-based cropping systems is a good agricultural management tool for researchers, farmers or decision makers to help chose the most appropriate types of rotation and fertilization practices. We thus suggest both mulching and biomass incorporation into the soil in yam based-cropping systems with legumes. We then propose to promote durable and replicable yam-based systems, through a favorable legislative, economic and political environment to support local initiatives. Collaborations between research, development and extension structures should also be favored to support the development and dissemination of innovations. Further research is needed on yam production with zero tillage under mulch covering, the forage legume-crop-livestock integration within fence systems.

The chapter 2.3 slights the impact of yam-based systems with herbaceous legumes promoted by the research on soil productivity (assessment of yam dry matter production, nutrients recycled in leaves and removed from yam tuber, profitability and soil fertility changes).

Productivity of yam-based systems with herbaceous legumes and short fallows in the Guinea-Sudan transition zone of Benin

R. Maliki, M. Toukourou, B. Sinsin, P. Vernier

Nutrient Cycling in Agroecosystems (Vol. 92, n°1, p. 9. DOI: 10.1007/s10705-011-9468-7)

Chapitre 2.3.

Productivity of yam-based systems with herbaceous legumes and short fallows in the Guinea-Sudan transition zone of Benin

Abstract

The principal driving force in agricultural research is to increase the yield of food crops. For farming to remain productive, it will be necessary to replenish the nutrients removed or lost from the soil. The objective of this study was to determine the impact of yam-based systems on soil productivity (yam dry matter production, yam nutrients recycled or removed, profitability and soil fertility changes). We compared smallholders' traditional systems (1-year fallow of *Andropogon gayanus*-yam rotation, Maize + 100 kg N₁₄P₂₃K₁₄ + 50 kg Urea – yam rotation) with yam-based systems with legumes (*Aeschynomene histrix* /maize intercropping + 100 kg N₁₄P₂₃K₁₄ + 50 kg Urea – yam rotation; *Mucuna pruriens* var *utilis*/maize intercropping + 100 kg N₁₄P₂₃K₁₄ + 50 kg Urea – yam rotation). The production of dry matter (tubers, shoots), nutrients removed or recycled, and soil properties were significantly improved on yam-based systems with legumes in comparison with traditional systems. Year × Treatment interactions influenced significantly the tuber dry matter production. Site × Treatment and Treatment × Farmer interactions affected significantly nutrients removed or recycled. The amount of nutrients recycled or removed was dependent on the dry matter production that, in turn, depended on soil fertility, rainfall and farmers' effect. Yam-based systems with legumes brought a higher present value than traditional systems in the first 4 years and appeared attractive for land, labour and cash productivities.

Keywords: *Dioscorea rotundata*; Crop rotation; Nutrient recycling; Herbaceous legumes; Net present value

Introduction

Yam (*Dioscorea* spp.) is a tuber crop widely cultivated in the humid and sub-humid lowland regions of West Africa and the Caribbean (Onwueme and Haverkort 1991). More than 90% of the worldwide production (40 million metric tons of fresh tubers year⁻¹) comes from West Africa (FAOSTAT 2009). Yam is grown in traditional cropping systems as the first crop after virgin forest or after a long fallow period yielding about 10 t of fresh tubers ha⁻¹ year⁻¹ (Carsky et al. 2001). But when the soil fertility is high, the potential yield of species *Dioscorea rotundata* (*D. rotundata*) can easily reach 25-30 t ha⁻¹ (Vernier and Dossou, 2000). The increase in yam production has been due more to land expansion than to crop improvement potential (FAO 2003). For example, the production increase of 7.6% in West Africa was mainly due to an increase in area of 7.2% and only 0.4% was due to an improvement in crop productivity itself (FAO 2003).

Yam is a demanding crop in terms of organic matter and soil fertility, especially the most appreciated and market-valued cultivars (early maturing *D. rotundata*) used for the popular dish called *Fufu* (pounded yam) (Vernier and Dossou 2003). Yam tubers are indeed known to export from the soil large quantities of nitrogen (N) and potassium (K) (O'Sullivan and Ernest 2008). According to Degras (1986), the harvest of 30 t ha⁻¹ of fresh yam yield takes up 120 N kg ha⁻¹, 5.1 P kg ha⁻¹, and 111 K kg ha⁻¹.

Yam cultivation in West Africa is now confronted with the scarcity of fertile soil available for clearing (Cornet et al. 2006). In Benin nowadays, farmers hardly have the possibility to rely on long duration fallow and yam is being cultivated in 1 or 2-year herbaceous fallow–yam or maize-yam rotation systems with manual incorporation of residue into the soil (Doumbia 2005; Maliki 2006). Smallholder farmers removed important quantities of nutrient from their soil without applying a sufficient quantity of manure or fertilizer to replenish the soil (Saidou 2006).

Since the demand for yam keeps increasing due to the continued population growth, while reserves of arable land are diminishing, and fallow duration is decreasing. It is becoming necessary to sustainably increase yam productivity in sedentary cropping systems (O'Sullivan and Ernest 2008). There is a dire need therefore to assess in farmers' conditions the economic performance of sustainable cultivation techniques. Ongoing soil degradation could be reduced by the adoption of new farming techniques such as improved fallows of herbaceous legumes (Carsky et al. 1998; Becker et al. 1999).

Studies on improved fallow practices are generally grain-oriented (cereals, such as maize), whereas very little has been done on root and tuber crops, especially yam. Comparative studies are lacking that assess the effects of yam-based technologies with herbaceous legumes intercrops and short fallows on yam production and soil properties in the savannah transition agro-ecological zone of Benin. We compared in a perennial experiment for 4 years, with 2-year rotations, smallholder farmers' traditional rotations maize-yam or 1-year *Andropogonon gayanus* fallow–yam, with rotations intercropped *Aeschynomene histrix* with maize-yam or intercropped *Mucuna pruriens* with maize-yam. The amount of nutrients recycled or removed in yam-based cropping systems could be dependent on plant dry matter production that, in turn, depend on climate (rainfall) and soil fertility conditions. The objective of this study was to determine the impact of yam-based systems on soil productivity (dry matter production, nutrients recycled or removed, profitability and soil fertility changes).

Materials and methods

Study sites and experiment design

Study sites and experiment design are described in chapter 2.1.

Data collection

Composite soil samples were collected in each field before the beginning of the experiment along plot transects at soil depths of 0-10 cm and 10-20 cm (32 farm fields \times 2 depths = 64 samples) in order to determine soil characteristics. At the end of 2005 before yam harvesting, composite soil samples were collected at the same depths in the mounds along plot transects (32 farm fields \times 4 treatments \times 2 depths = 256 samples).

Prior to ridging, in four 1 m² quadrats within each plot the aboveground biomass of herbaceous legumes and fallow was collected in October 2002 and 2004. The biomass samples were dried at 60 °C until constant weight and then dry weight was determined. At maturity, maize grain and stover were harvested per row on each plot and DM determined.

The fresh yam tuber weight and DM of yam tubers and shoots were estimated on each plot in December 2003 and 2005.

Soil and plant nutrients content

The plant nutrient content was estimated according to the biomass amount. Soil and plant macronutrients content (N, P, and K) were analyzed. Nitrogen (N) content was analyzed using the Kjeldahl method, available phosphorus with the Bray 1 method, potassium with the FAO method, organic carbon with the Walkley and Black method, soil fractionation with Robinson method and pH (H₂O) (using a glass electrode in 1:2.5 v/v soil solution). Only yam tuber and maize grain were removed, and all other plants parts were recycled (*Andropogon*, maize stover, yam shoot, *Aeschynomene* and *Mucuna*). Yam or *Mucuna* shoot included leaves. Nutrient removed or recycled was calculated as a summation of nutrient concentration time dry matter of the respective plant parts. Dry matter removed or recycled was calculated as a summation of dry matter of the respective plant parts.

Statistical analysis

Analysis of variance (ANOVA) was applied to the DM production (tubers, shoots), nutrient contribution to the systems and soil properties at depths (0-10 and 10-20 cm) using a randomized block design and a partial nested model with five factors as described in chapter 2.1.

Economic analysis

A simple financial analysis was performed to evaluate the profitability of each yam-based cropping system. We considered the time horizon 2002-2005 (4 years) and a discount rate of 10%, World Bank standard, not too far from bank interest rates. The choice of discount rate is always an object of controversy among economists (Stern 2006). We considered discount rates ranging from 0% to 50% for sensitivity analysis.

The net present value is as follows:

$$NPV = (TPR - TPC) \text{ or}$$

$$NPV = \sum_{i=1}^n \frac{R_n}{(1+r)^n} - \sum_{i=1}^n \frac{D_n}{(1+r)^n} = \sum_{i=1}^n \frac{(R_n - D_n)}{(1+r)^n} \quad (1)$$

NPV = Net Present Value (US\$)

TPR = Total Present Revenue (US\$)

TPC = Total Present Cost (US\$)

R_n = Revenue in the year n (US\$)

D_n = Cost in the year n (US\$)

r = Discount rate (%)

Returns on investment (RI %) were also computed through the formula:

$RI = 100 \times (NPV/TPC)$, with $RI >$ interest rate on capital, profitability is implied (2).

Labour productivity US\$ per man-day (LP) was given by: $LP = NPV/L$, where L (man day) is the total labour requirement (3).

Economic yields for maize were based on 15% moisture content while that of yam was based on fresh weight. Costs of production were divided into land (hired land cost US\$ ha⁻¹ year⁻¹), inputs (maize, yam and legume seeds, fertilizers costs) and labour (farm activities costs for yam-based cropping systems establishment and management). Land, inputs and labour costs were determined based on local prices in the 2002-2005 cropping seasons. We considered the average annual prices for food crops (maize and yam) based on the prevailing market price (Glazoué market in the central Benin). All amounts of money are expressed in US dollars (501.8 FCFA to US\$ 1, 1 December 2010).

Results

Soil chemical properties

The initial soil organic matter (SOM) contents were low in all fields, ranging from 0.93 and 2.25%, and the C:N ratio ranged from 8.7 to 11.7 (chapter 1). Available P levels were very low and varied from 3.0 to 20.1 ppm. Soil N concentration ranged from 0.056 to 0.112%. N, P and SOM contents were significantly higher in 0-10 cm than in 10-20 cm depth, except at Gbanlin site for N and SOM. Gomè site showed for both soil depths, the lowest values of carbon (C%), N%, P (ppm), and organic matter (%) whereas Akpéro had the highest values. The end of study soil analysis showed soil chemical properties (SOM%, N %, P (ppm), K⁺ cmol kg⁻¹, and PH water) significantly higher in TMA and TMM than in traditional systems T0 and TM ($P < 0.001$). Soil clay contents were significantly higher in TMA, TMM and T0 than in TM ($P < 0.001$) (Table 1).

Table 1: End of study soil characteristics at 0-10 cm and 10-20 cm soil layers in four villages (Akpéro, Gbanlin, Miniffi, Gomè) in Benin

Soil characteristics	Depth (cm)	T0	TM	TMA	TMM	LSD
Clay%	0-10	5.82a	5.52b	5.94a	5.96a	0.30
	10-20	5.93a	5.61b	6.01a	6.05a	0.32
Silt%	0-10	9.55a	9.68a	9.52a	9.53a	ns
	10-20	9.71a	9.81a	9.67a	9.65a	ns
Sand%	0-10	84.63a	84.80a	84.54a	84.51a	ns
	10-20	84.36a	84.58a	84.32a	84.30a	ns
C%	0-10	0.77c	0.76c	0.82b	0.87a	0.05
	10-20	0.72c	0.70c	0.78b	0.83a	0.05
N %	0-10	0.06d	0.08c	0.09b	0.10a	0.01
	10-20	0.07c	0.09b	0.10a	0.10a	0.01
C : N ratio	0-10	12.0a	10.1b	9.3c	9.0c	0.7
	10-20	11.1a	8.3b	8.3b	8.3b	0.7
SOM%	0-10	1.32c	1.31c	1.41b	1.49a	0.08
	10-20	1.24c	1.21c	1.34b	1.43a	0.09
Bray P mg kg ⁻¹	0-10	10.21c	11.84b	13.43a	14.35a	1.23
	10-20	8.75c	10.66b	11.41ab	12.29a	1.36
K ⁺ cmol kg ⁻¹	0-10	0.33d	0.42c	0.50b	0.54a	0.04
	10-20	0.27d	0.33c	0.41b	0.45a	0.04
PH water	0-10	6.0c	6.7b	7.1a	7.0a	0.17
	10-20	6.0c	6.6b	7.1a	7.0a	0.18

Means with the same letter within row are not significantly different ($p < 0.05$);

Legend: C g kg⁻¹: soil carbon concentration (g kg⁻¹); N g kg⁻¹: soil nitrogen concentration (g kg⁻¹); OM% (= 1.72× C%): soil organic matter content (%); C:N: Index of biodegradability or ratio of soil carbon to nitrogen; P. ass. Bray (ppm): soil phosphorus; K⁺: soil potassium; LSD: Least square difference at 5%; SD: Standard deviation; TMA: *Aeschynomene histrix* intercropped with maize-yam rotation; TMM: *Mucuna pruriens* intercropped with maize-yam rotation; T0 control 1: 1-year fallow with *Andropogon*-yam rotation; TM control 2: maize-yam rotation.

SOM, N, P, K, and pH increased by 0.15; 0.02; 19; 29 and 10% respectively for both soil depths in TMA and TMM whereas soil clay contents increased by 0.27%.

DM production and nutrient contribution to the systems

Table 2 shows the average nutrient composition in different sources of biomass dry matter (DM).

Table 2: Nutrient composition in different sources of biomass dry matter (*Andropogon*, maize, *Aeschynomene*, *Mucuna*, yam shoot, yam tuber, maize grain) in the 2003 and 2005 cropping seasons in four villages in Benin

	Source of biomass	N (%)	P (%)	K (%)
2003 cropping season	<i>Andropogon</i> stover	1.16±0.28	0.13±0.09	0.49±0.16
	Maize stover	0.91±0.16	0.13±0.03	0.50±0.12
	Maize grain	2.17±0.22	0.33±0.10	0.27±0.08
	<i>Aeschynomene</i> stover	2.02±0.31	0.14±0.05	0.63±0.03
	<i>Mucuna</i> stover	2.21±0.59	0.18±0.08	0.63±0.02
	Yam shoot	1.10±0.24	0.15±0.03	1.38±0.20
	Yam tuber	0.38±0.10	0.04±0.02	0.42±0.05
2005 cropping season	<i>Andropogon</i> stover	1.20±0.37	0.13±0.10	0.50±0.16
	Maize stover	1.05±0.30	0.15±0.05	0.55±0.14
	Maize grain	2.15±0.23	0.32±0.11	0.25±0.08
	<i>Aeschynomene</i> stover	2.02±0.73	0.14±0.08	0.63±0.20
	<i>Mucuna</i> stover	2.20±0.40	0.18±0.08	0.65±0.10
	Yam shoot	1.08±0.24	0.12±0.04	1.35±0.17
	Yam tuber	0.37±0.10	0.04±0.01	0.41±0.06

Data are the means ± SD (Standard deviation).

Intercropped *Mucuna* with maize-yam rotation (TMM) gave more DM and nutrient recycled or removed than the intercropped *Aeschynomene* with maize– yam rotation (TMA) (Table 3).

Table 3: Dry matter (t ha⁻¹) of yam tubers removed at harvest and yam shoots recycled in the 2002-2003 and 2004-2005 cropping seasons in four villages in Benin

2002-2003 cropping seasons							2004-2005 cropping seasons				
		T0	TM	TMA	TMM	LSD	T0	TM	TMA	TMM	LSD
DM removed tubers (t ha ⁻¹)	Yam	5.09b	3.83c	7.20a	7.33a	0.51	4.34b	3.02c	8.00a	8.02a	0.55
DM recycled shoots (t ha ⁻¹)	Yam	1.27b	0.96c	1.80a	1.83a	0.13	1.09b	0.76c	2.00a	2.00a	0.14

Means with the same letter within row are not significantly different (p < 0.05).

Legend: DM: Dry matter; LSD: Least square difference at 5%.

The ANOVA partial nested model on DM production (tubers, shoots) showed significant differences between treatments (P < 0.001). Year × Treatment interactions influenced significantly the tuber dry matter production (P < 0.01).

Amounts of N, P, and K removed in yam tuber and those recycled in yam shoot were significantly higher in TMA and TMM than in traditional systems T0 and TM (Table 4).

Table 4: Nitrogen, Phosphorus and Potassium content (kg ha^{-1}) removed in yam tubers at the crop harvest and those recycled in yam shoots in the 2002-2003 and 2004-2005 cropping seasons in four villages in Benin

2002-2003 cropping seasons							2004-2005 cropping seasons				
	T0	TM	TMA	TMM	LSD		T0	TM	TMA	TMM	LSD
Plant nutrients removed (kg ha^{-1})											
Yam tubers	N	19.35b	14.57c	27.37a	27.84a	1.95	16.49b	11.48c	30.41a	30.47a	2.08
	P	1.99b	1.49c	2.81a	2.86a	0.20	1.69b	1.18c	3.12a	3.13a	0.21
	K	21.39b	16.10c	30.25a	30.77a	2.16	18.23b	12.70c	33.61a	33.68a	2.30
Plant nutrients recycled (kg ha^{-1})											
Yam shoots	N	14.01b	10.54c	19.81a	20.15a	1.41	11.72b	8.16c	21.60a	21.65a	1.48
	P	1.91b	1.44c	2.70a	2.75a	0.19	1.30b	0.91c	2.40a	2.41a	0.16
	K	17.57b	13.22c	24.85a	25.28a	1.77	14.65b	10.20c	27.01a	27.06a	1.85

Means with the same letter within row are not significantly different ($p < 0.05$)

Legend: LSD: Least square difference at 5%.

Site \times Treatment and Treatment \times Farmers' interactions were significant ($P < 0.001$).

Relative profitability of yam-based cropping systems

Table 5 shows the estimated total present production cost (TPC), the net present value (NPV) ($\text{US\$ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) and labour productivity (LP) ($\text{US\$ man-day}^{-1}$) and return on investment (RI) (%) of yam-based cropping systems with a discount rate of 10%.

Table 5: Estimated annual present production cost, net present value (US\$ ha⁻¹), labour productivity (US\$ man-day⁻¹) and return on investment (%) in the 2002-2003 and 2004-2005 cropping seasons in four villages in Benin: time horizon 4 years and discount rate (10%)

	T0	TM	TMA	TMM
Economic yield (t ha ⁻¹)				
Yam	9.43	6.85	15.20	15.34
Maize	-	1.80	1.68	1.63
Total present revenue (US\$ ha ⁻¹)	775	763	1380	1457
Production cost (US\$ ha ⁻¹)				
Land	10	10	10	10
Input	349	382	385	390
Labour	219	335	381	392
Total present cost (US\$ ha ⁻¹)	474	585	623	635
Net present value (US\$ ha ⁻¹)	301	178	757	822
Return on investment (%)	62	29	145	152
Labour (man- day ⁻¹)	63	96	111	112
Labour productivity (US\$ man-day ⁻¹)	5	2	7	7

Inputs costs: Yam seeds (US\$ 697.5 ha⁻¹); Maize grains (US\$ 6.0 ha⁻¹); *Mucuna* grains (US\$ 15.9 ha⁻¹); *Aeschynomene* grains (US\$ 7.0 ha⁻¹); Fertilizers (NPK+Urea) (US\$ 59.8 ha⁻¹).

Labour cost: Land clearing (US\$ 29.9 ha⁻¹); Tillage (US\$ 79.7 ha⁻¹); Maize planting (US\$ 5.0 ha⁻¹); NPK spreading (US\$ 27.9 ha⁻¹); Urea spreading (US\$ 19.9 ha⁻¹); *Aeschynomene* planting (US\$ 10.0 ha⁻¹); *Mucuna* planting (US\$ 7.0 ha⁻¹); Weeding (US\$ 39.9 – 47.8 ha⁻¹); Maize harvesting+Transport (US\$ 59.8 ha⁻¹); Ridging (US\$ 124.6 – 149.5 ha⁻¹); Seed yam planting (US\$ 39.9 ha⁻¹); Yam harvesting (US\$ 79.7 ha⁻¹)

The yam-based cropping systems with herbaceous legumes (TMA and TMM) resulted in the highest NPV (US\$757 and US\$822) and corresponded to a return on investment (RI) that ranged from 145% to 152% respectively. The traditional yam-based systems (T0 and TM) showed the lowest NPV (US\$301 and US\$178) and RI ranged from 62% to 29%. TMM or TMA showed the highest labour productivity (US\$7 man-day⁻¹) whereas T0 and TM had the lowest (US\$5 and US\$2 man-day⁻¹) respectively.

Figure 1 depicts the NPVs of yam-based cropping systems with herbaceous legumes (TMA and TMM) in comparison with controls (T0 and TM) with a time horizon of 4 years (2002-2005) according to various discount rates (0% - 50%).

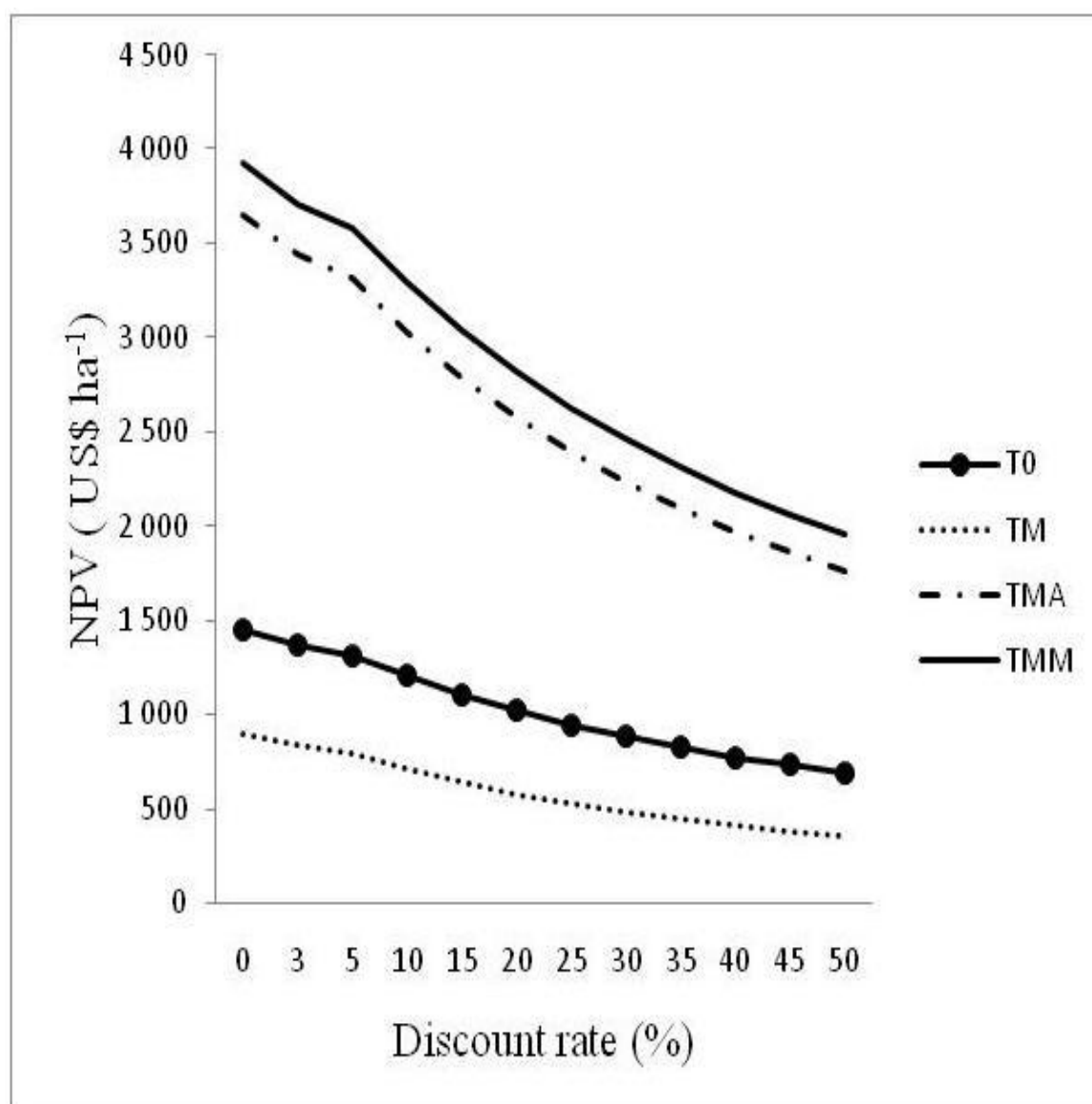


Figure 1: Profitability of yam-based cropping systems with herbaceous legumes in comparison with traditional systems (time horizon: 4 years) in the transition zone of Benin. *NPV*: Net Present Value

The discount rates reflect the alternative of the investment opportunities and the diverse farmers' preference for investments rather than an immediate income. For various discount rates, TMA and TMM would bring a significantly higher present value than T0 and TM in the first 4 years.

Discussion

Impact of yam-based cropping systems on soil properties

Soil clay contents improvement in T0, TMA and TMM at the end of the perennial experiment could be due to the collect of the composite soil samples in the mounds along plot transects integrating soil from the depth related to the ridging. Furthermore, soil chemical characteristics were higher in (TMA, TMM) than in (T0, TM). Organic materials supplied could contribute directly to the building of soil organic matter (SOM), which itself performs diverse functionary roles in improving the physical, chemical and biological composition of the soil (Sanginga and Woomer 2009).

DM production

DM of yam tubers removed and shoots recycled on TMA and TMM were significantly higher in the 2005 (dry year) than in the 2003 (rainy year). In our study, rainfall distribution varied among years and sites, particularly from January to May, i.e. 20 weeks after yam was planted. The production of yam yield mainly depends on the effective duration of the transition to autotrophy, i.e. the stage of vegetative development of the crop without the supply of reserves from the mother tuber (Degras 1986). The beginning of autotrophy, which occurs when real leaves grow, is determined by the beginning of the rainy season. Consequently, a delayed rainy season could be prejudicial to crop growth and yam production. In 2005, even though there was a drought, the favorable early rainfall distribution after yam planting can have positively affected yam DM production. Furthermore, the chemical fertilizers applied and the above biomass DM of intercropping maize and herbaceous legume recycled and accumulated in 2002, 2003 and 2004 could have resulted in a combined beneficial effect of water, nutrient use and plant growth in 2005. Table 5 shows that in 2005 tubers and shoots of yam are less on T0 and TM and more on TMA and TMM: this is in good accordance with the hypothesis that the accumulation of nutrients in the soil is the main cause of the differences of yield between 2003 and 2005.

DM amounts of *Mucuna*, *Aeschynomene* and maize stover recycled or maize grain removed were higher in the 2002-2003 (humid year) than in 2004-2005 (dry year). In fact, plant yields and agronomic productivity were constrained by recurring drought stress

exacerbated by highly variable and unpredictable rains. *Mucuna* stover showed the highest DM amount followed by *Aeschynomene* whatever the year and this could reach 10 t ha⁻¹ (Carsky et al. 1998). Indeed, *Mucuna*, compared with *Aeschynomene*, grows more rapidly and close.

Plant nutrients contribution to the systems

The nutrient (N, P, and K) levels removed or recycled fit the DM production (tubers, shoots) and then varied according to treatment and cropping season. The significantly higher nitrogen (N) contributions to the systems in 2002-2003 and 2004-2005 cropping seasons were recorded in intercropped *Mucuna* with maize-yam rotation (TMM) followed by the intercropped *Aeschynomene* with maize– yam rotation (TMA). All N requirements in the 1-year fallow – yam rotation (T0) and the maize – yam rotation (TM) were obtained respectively from fertilizers and soil whereas in TMA and TMM, N was derived from biological nitrogen fixation (BNF), soil and fertilizer. The levels of nitrogen content in TMM and TMA were significantly higher in the 2002-2003 (rainy year) than in 2004-2005 (dry year). Generally, studies revealed that the incorporation of the biomass gets more nitrogen to the succeeding crop than the mulch application on the soil because the decomposition of organic matter is more rapid after incorporation (Hulugalle et al. 1985; Franzen et al. 1994; Ibewiro et al. 2000).

TMA and TMM removed significantly more P than T0 (Table 4). The high nutrient removal is due to the high yield observed in those treatments. Our results showed that *Mucuna* improved soil P. Legumes fallows with *Mucuna*, are known especially for improving the quantity of available P fractions in the soil for subsequent crops (Salako and Tian 2003). Nevertheless, it depends on the inherent P levels in the soils. *Mucuna* root exudates could solubilize P increasing its availability.

As far as K is concerned, the quantity recycled with maize stover, yam shoots and *Mucuna* or *Aeschynomene* stover was twice as high as that which was removed with maize grain and yam tubers from the systems. The soil K concentrations were low in our study. Indeed in this type of soil, there is no K response of the crops for many years without K fertilization. Igué (2000) showed the soil K concentration of 0.82 cmol kg⁻¹ at 0-20 cm depth and decreased significantly with cultivation.

Profitability of cropping systems

The yam-based systems (TMM and TMA) showed highest land and cash productivities with net present value levels significantly higher than the other systems (T0 and TM). However, TMM and TMA demand an additional labour compared with local yam-based systems but allowed for a better labour productivity.

These results agree the work of Adjei-Nsiah et al. (2007) that revealed the highest net revenue and returns on investment (62 %) in the cropping sequences *Mucuna*-maize with N fertilizer application to maize in Ghana. Furthermore, former work reported the profitability of intensification technologies with a positive effect on farm household income (Olarindé 2006). Annual farm incomes were higher under the repeated leguminous cover crops method (RLCC) in southwestern Nigeria for food crops, mainly with yam and cassava (Olarindé 2006). This also was obtained where the use of repeated leguminous cover crops comes into play to enhance soil fertility and to prevent degradation which is the bane of production in the study area.

Conclusion

The study highlights how smallholder farmers who practice *Mucuna pruriens* var *utilis* or *Aeschynomene histrix* in yam-based cropping systems can meet their immediate food security and cash needs while maintaining soil fertility. The production of yam on marginal land where the biomass of herbaceous legumes is available and incorporated into the soil can serve as a means of allowing smallholder farmers with limited access to finance to improve the fertility of their soils. The production of dry matter (tubers, shoots), nutrients removed or recycled, soil properties were significantly improved on yam-based systems with legumes in comparison with traditional systems. The amount of nutrients recycled or removed was dependent on the dry matter production that, in turn, depended on soil fertility, rainfall and farmers' effect. Yam-based systems with legumes appeared attractive for land, labour and cash productivities.

Therefore, yam yield increase in the Guinea-Sudan transition zone of Benin will depend on the capacity to restore the soil fertility (organic matter, nutrients) and make water available at least 20 weeks after yam was planted for a better tuber performance. The study thus suggests that these yam-based cropping systems with herbaceous legumes could be an alternative to the traditional continuous cropping systems and long-duration fallow.

The chapter 2.4 studies the relative importance of soil fertility, crop management climate factors in determining yield variability and the gap between farmers' yam yields and attainable yields in the Guinea-Sudan transition zone of Benin.

**Yam yield variability as affected by the soils fertility, crop
management and climate in the Guinea-Sudan transition
zone of Benin**

Maliki Raphiou, Sinsin Brice, Floquet Anne, Malézieux Eric

Experimental Agriculture (Submitted manuscript in 2012)

Chapitre 2.4.

Yam yield variability as affected by the soils fertility, crop management and climate in the Guinea-Sudan transition zone of Benin

Abstract

Yam (*Dioscorea rotundata*) cultivation in most of the growing areas of Africa experiences huge yield variability resulting in a large yield gap between the potential and actual yield. The aim of this study was to investigate the relative importance of soil fertility, crop management and climate factors in determining yield variability and the gap between farmers' yam yields and attainable yields. With the aim of designing more sustainable yam cropping systems in the Guinea-Sudan transition zone of Benin, we compared smallholders' traditional systems (1-year fallow of *Andropogonon gayanus* -yam rotation; maize-yam rotation) with yam-based systems with legumes (intercropped *Aeschynomene histrix* with maize-yam rotation; intercropped *Mucuna pruriens* with maize-yam rotation). Our results show: (1) improved rotations with legumes increased attainable yields from 13.5 to 22.9 t ha⁻¹; (2) yam yield gaps ranged from 3 to 14 t ha⁻¹; (3) soil fertility conditions (biomass K, soil organic matter, organic biomass, and soil phosphorus), crop management (land use intensity, weeding, crop duration, crop density, and mound height) and cumulative amount of rainfall in the 6th month of the yam growing period as important factors to yam production. Therefore, the potential to increase yam yield will depend on the capacity to restore their soil fertility with improved rotations through an adequate crop management (mound height adapted to seed yam size, early yam planting, 2-4 times of weeding) and make water available in the 6th month of the yam growing period for a better tuber performance. Understanding the relative importance of these factors to the yield gap is a necessary step to guide the design of relevant research for development interventions aimed at improving yam productivity. The application will allow to natural resources better preserved, greenhouse gas emissions in land or soils to be reduced, or soil capacity to act as a carbon sink to be enhanced.

Keywords: Agriculture; Boundary line analysis; Climate; Crop management; Herbaceous legumes; Organic farming; Soil fertility; Stepwise regression analysis

1. Introduction

Yam (*Dioscorea* spp.) is a tuber crop widely cultivated in the humid and sub-humid lowland regions of West Africa and the Caribbean. More than 90% of the worldwide production (40 million metric tons of fresh tubers year⁻¹) is produced in West Africa (FAOSTAT, 2011).

Yam cultivation in West Africa is now confronted with the scarcity of fertile soil available for clearing. The decline in yam yield under continuous cultivation has led to the largely accepted conclusion that yam requires a high level of natural soil fertility. Demand for yam keeps increasing due to the continued population growth while reserves of arable land are diminishing, and fallow duration is decreasing. Ongoing soil degradation could be reduced by the adoption of new farming techniques such as improved fallows of herbaceous legumes.

It is widely recognized that major investments in improving soil and crop management are required to raise agricultural productivity in sub-Saharan Africa (Tittonell et al., 2008). The evidence base is widespread negative nutrient balances on smallholder farms and the large yield gap between potential and actual yields, both observations being causally related (Vanlauwe and Giller, 2006). Understanding the relative importance of these factors to the yield gap is a necessary step to guide the design of relevant research for development interventions aimed at improving yam productivity. The yield gap is generally defined as the difference between actual farmer yields and potential yield, whereby potential yield is the maximum yield that can be achieved in a given agro-ecological zone. For practical purposes it is, however, more interesting to study the gap between the actual and attainable yield, whereby the attainable yield can be defined as the maximum yield observed in a given agro-ecological zone with a given management intensity (Fermont et al., 2009). Yam yield variability had generally been attributed to poor soil fertility (Diby et al., 2009), pests and diseases (Coyne et al., 2006), farmers' resource allocation decisions (Nkonya et al., 2005) and agronomic practices, or combinations of these factors (Samake' et al., 2006). Agronomic management decisions combine efficient use of soils and crop resources to achieve better crop yield.

Smallholder farmers in central Benin, carried out a two year rotation experiment, 1-year fallow of *Andropogonon gayanus* -yam rotation or maize-yam rotation, compared with intercropped *Aeschynomene histrix* with maize-yam rotation or intercropped *Mucuna pruriens* with maize-yam rotation. This study thus aims to investigate the relative importance of soil fertility, crop management climate factors in determining yield variability and the gap

between farmers' yam yields and attainable yields in the Guinea-Sudan transition zone of Benin (West Africa).

2. Materials and methods

2.1. Study sites and experiment design

The study was carried out in the Guinea-Sudan transition zone of Benin (centre of Benin) described in chapter 2.1.

2.2. On-farm experiment

Smallholder carried out a two year rotation experiment of yam-based cropping systems repeated twice (2002-2005) as described in chapter 2.1.

2.3. Data collection

In each farm field, composite soil samples were collected at 0-20 cm depths along plot transects before the beginning of the experiment in 2002 (32 farm fields \times 4 plots \times 1 depth = 128 samples) and at the beginning of 2004 in order to determine soil characteristics.

The aboveground biomass of herbaceous legumes and fallow was collected and dried as described in chapter 2.1.

2.4. Soil and plant nutrients content

Soil and plant macronutrients content (N, P, and K) were analyzed as mentioned in chapter 2.2.

2.5. Model description

The dependent variable was yam yields. Smallholders' endogenous knowledge on factors affecting yam yield slighted mainly soils, rainfall and management. We then identified and quantified explanatory variables related to soil fertility (soil organic matter, clay, silt, sand, total nitrogen, phosphorus, biomass N, biomass P, and biomass K), crop management (crop duration, crop density, mound height, land position, weeding number, and land use intensity) and climate (cumulative amount of rainfall in the 6 or 12th month of the yam growing period, sunshine, hygrometry, temperature). Climatic data were collected at National meteorological station of Benin.

2.6. Data analysis

2.6.1. Analyses of variance to test the effect of site, year and treatment on yam yield

ANOVA using the general linear model (GLM) procedure was applied to yam yield using a partial nested model with five factors as described in chapter 2.1.

2.6.2. A multiple regression model analysis for explaining yield variability

The general linear model procedure in SAS (GLM) was used to carry out the analysis of variance (ANOVA) for explaining yield variability. Analyses were done for the entire data set and for each site separately. Where required, variables were transformed to normality using Box–Cox power transformations. Subsequently, Pearson’s correlation analyses were used (Table 1).

Table 1: Pearson correlation between variables in the Guinea-Sudan transition zone of Benin

Variables	N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Rainfall_0_6	1																			
Rainfall_0_12	2	-0.32 (0.00)																		
Sunshine	3	-0.35 (0.00)	0.96 (0.00)																	
SOM	4	0.08 (0.20)	0.45 (0.00)	0.46 (0.00)																
N	5	0.23 (0.00)	0.39 (0.00)	0.44 (0.00)	0.91 (0.00)															
P	6	0.27 (0.00)	0.12 (0.05)	0.14 (0.02)	0.90 (0.00)	0.84 (0.00)														
Clay	7	0.03 (0.64)	-0.20 (0.00)	-0.04 (0.53)	0.07 (0.23)	0.08 (0.19)	0.28 (0.00)													
Silt	8	0.27 (0.00)	-0.16 (0.01)	0.00 (0.97)	0.04 (0.54)	0.06 (0.37)	0.19 (0.00)	0.58 (0.00)												
Sand	9	-0.25 (0.00)	0.17 (0.00)	0.00 (0.97)	-0.04 (0.48)	-0.06 (0.32)	-0.21 (0.00)	-0.65 (0.00)	-0.99 (0.00)											
Biomass	10	-0.06 (0.31)	0.18 (0.00)	0.19 (0.00)	0.17 (0.00)	0.15 (0.01)	0.12 (0.06)	0.02 (0.78)	-0.03 (0.62)	0.03 (0.67)										
Biomass N	11	-0.03 (0.64)	0.01 (0.86)	0.00 (0.98)	0.00 (0.92)	0.01 (0.90)	-0.00 (0.99)	-0.01 (0.85)	-0.09 (0.12)	0.09 (0.14)	0.76 (0.00)									
Biomass P	12	-0.02 (0.80)	0.04 (0.51)	0.00 (0.99)	0.22 (0.00)	0.22 (0.00)	0.24 (0.00)	-0.02 (0.70)	-0.33 (0.00)	0.31 (0.00)	0.59 (0.00)	0.59 (0.00)								
Biomass K	13	-0.08 (0.21)	0.02 (0.74)	0.00 (0.95)	-0.04 (0.48)	-0.04 (0.53)	-0.07 (0.29)	-0.04 (0.48)	-0.17 (0.00)	0.17 (0.00)	0.81 (0.00)	0.89 (0.00)	0.73 (0.00)							
Crop duration	14	-0.04 (0.55)	-0.06 (0.33)	0.00 (1.0)	-0.53 (0.00)	-0.54 (0.00)	-0.60 (0.00)	-0.03 (0.59)	0.50 (0.00)	-0.46 (0.00)	-0.11 (0.09)	-0.09 (0.15)	-0.45 (0.00)	-0.09 (0.11)						
Crop density	15	-0.25 (0.00)	-0.17 (0.00)	0.00 (1.0)	-0.35 (0.00)	-0.25 (0.00)	-0.17 (0.00)	0.64 (0.00)	0.29 (0.00)	-0.34 (0.00)	0.00 (0.99)	0.00 (0.96)	-0.04 (0.50)	0.02 (0.79)	0.05 (0.43)					
Mounds size	16	-0.15 (0.02)	-0.19 (0.00)	0.00 (1.0)	-0.49 (0.00)	-0.42 (0.00)	-0.37 (0.00)	0.59 (0.00)	0.67 (0.00)	-0.69 (0.00)	-0.05 (0.39)	-0.05 (0.40)	-0.31 (0.00)	-0.06 (0.30)	0.55 (0.00)	0.74 (0.00)				
Weeding	17	0.01 (0.84)	-0.11 (0.09)	0.00 (1.0)	-0.27 (0.00)	-0.23 (0.00)	-0.24 (0.00)	0.26 (0.00)	0.55 (0.00)	-0.54 (0.00)	-0.04 (0.49)	-0.05 (0.41)	-0.28 (0.00)	-0.08 (0.23)	0.43 (0.00)	0.24 (0.00)	0.59 (0.00)			
Land position	18	-0.15 (0.02)	-0.08 (0.18)	0.00 (1.0)	-0.42 (0.00)	-0.36 (0.00)	-0.41 (0.00)	0.24 (0.00)	0.29 (0.00)	-0.30 (0.00)	-0.04 (0.56)	-0.02 (0.69)	-0.22 (0.00)	-0.01 (0.87)	0.47 (0.00)	0.47 (0.00)	0.49 (0.00)	0.27 (0.00)		
Land use intensity	19	0.04 (0.57)	-0.09 (0.161)	0.00 (1.0)	0.00 (0.93)	-0.01 (0.86)	0.09 (0.15)	0.44 (0.00)	0.37 (0.00)	-0.40 (0.00)	-0.00 (0.93)	-0.03 (0.67)	-0.08 (0.17)	-0.04 (0.48)	0.18 (0.00)	0.32 (0.00)	0.37 (0.00)	0.07 (0.24)	0.21 (0.00)	

Legend: Cell Contents: Pearson correlation and (P-Value)

Rainfall_0_6: Cumulative amount of rainfall in the 6th month of the yam growing period

Rainfall_0_12: Cumulative amount of rainfall in the 12th month of the yam growing period

Rainfall_0_6 is highly correlated to Rainfall_0_12; Sunshine is highly correlated to Rainfall_0_6 or Rainfall_0_12

For any pair of independent variables with great inter-correlations (r) ($P < 0.05$), only one variable was retained in the regression model. We computed the square of the semi-partial correlation coefficients to approximate the relative contribution of each explanatory variable to yield variability, while controlling for other variables in the equation (Cohen et al., 2003). A stepwise regression analysis was done to determine independent variables that were most responsible for the variation in yam yields.

2.6.3. Boundary line analysis for identifying yield gaps

To explore in more detail the contribution of individual independent variables to the yield gap, we slightly adapted the boundary line approach as used by Shatar and McBratney (2004). Our approach consisted of the following steps: (1) After sorting the independent variables in each village and in overall sites and removing outliers, we defined boundary lines that represented the maximum yield response (the dependent variable) to the various independent variables. Boundary lines were fitted through selected boundary points (Fermont et al., 2009). (2) Individual boundary lines were used to calculate for each field and each independent variable the maximum yam yield that could have been obtained if production would only have been limited by the independent variable in question ($y_{\max ij}$). (3) Lastly, we determined the yield gap caused by each independent variable in each field as the actual farmer yield minus $y_{\max ij}$.

3. Results

3.1. Soil fertility conditions, crop management, rainfall and yam yields

The soil fertility status of the study area was poor. Soil organic matter (SOM) contents were low in all fields, ranging from 0.7 to 2.5% at 0-20 cm soil depths in the 2002 and 2004 cropping seasons ($P < 0.001$) (Table 2). Total N ranged from 0.03 to 0.12% and available phosphorus from 6.7 to 22.0 ppm. Biomass N, P and K ranged from 2.0 to 276 kg ha⁻¹. Soil texture ranged from sandy loam to clay loam. Crop density varied between 6667 and 10000 mounds ha⁻¹ in traditional (T0, TM) as well as in yam based systems with herbaceous legumes (TMA, TMM). The number of weedings during both cropping seasons ranged from 2 to 4 ($P < 0.001$) between sites. Land use intensity varied between 1 and 4 cultivated areas around the

field experiment. Cumulative amount of rainfall in the 6th month of the yam growing period ranged from 288 to 505 mm between years (Table 2).

Table 2. Rainfall, soil fertility conditions, management variables and yam yields in the 2002-2003 and 2004-2005 cropping seasons in four villages in Benin

Variables	Characteristics	2002-2003 cropping season				2004-2005 cropping season			
		Average	Max	Min	SD	Average	Max	Min	SD
Dependent	Yam yield (t ha ⁻¹)	11.7	22.4	2.7	4.4	11.7	22.9	1.8	5.3
Climatic and soil fertility conditions	Rainfall_0_6 (mm)	332	357	304	19	375	505	288	80
	Rainfall_0_12 (mm)	1488	1685	1360	121	909	945	872	27
	Sunshine (hours year ⁻¹)	2403.6	2403.6	2403.6	0	2220	2220	2220	0
	Soil organic matter (%)	1.5	2.5	1.1	0.5	1.1	1.7	0.7	0.3
	Soil total nitrogen (%)	0.08	0.122	0.056	0.0	0.061	0.107	0.034	0.0
	Phosphorus (ppm)	11.5	22.0	6.7	5.2	10.2	18.0	6.7	3.9
	Clay (%)	6.5	7.4	5.5	0.5	6.5	7.5	5.5	0.5
	Silt (%)	10.1	17.5	5.5	4.1	10.1	17.5	5.5	4.1
	Sand (%)	83.4	89.0	75.0	4.5	83.4	89.0	75.0	4.5
	Organic biomass (t ha ⁻¹)	7.7	12.3	2.7	2.6	6.7	11.4	2.3	3.0
	Biomass N (Kg ha ⁻¹)	106.6	276.0	29.0	59.2	106.4	265.1	28.0	60.0
	Biomass P (Kg ha ⁻¹)	9.8	30.5	2.0	6.4	9.8	31.4	2.0	6.5
	Biomass K (Kg ha ⁻¹)	38.1	72.8	13.4	18.3	37.9	71.7	13.6	18.4
Management	Crop duration (days)	312.4	396.0	275.0	44.1	312.4	396.0	275.0	44.0
	Crop density (mounds ha ⁻¹)	8537	10000	6667	1344	8537	10000	6667	1344
	Mound height (m)	0.5	0.9	0.3	0.3	0.5	0.9	0.3	0.3
	Weeding number	2.6	4.0	2.0	0.7	2.6	4.0	2.0	0.7
	Land position	2.0	3.0	1.0	0.5	2.0	3.0	1.0	0.5
	Land use intensity	3.3	4.0	1.0	0.7	3.3	4.0	1.0	0.7

Max: maximum; Min: minimum; SD: Standard deviation

Climatic parameters as average temperature (°C), hygrometry (%) were similar from one site to another and from 2003 to 2005 during the yam growing periods.

Soil characteristics at 0-20 cm layers are related to 2002 and 2004 cropping seasons before yam planting;

Rainfall, yam yield and management variables are related to 2003 and 2005 cropping seasons

Rainfall_0_6 (mm): Cumulative amount of rainfall in the 6th month of the yam growing period

Rainfall_0_12 (mm): Cumulative amount of rainfall in the 12th month of the yam growing period

Crop duration is the plant production cycle between yam planting and harvesting; Crop density is the number of the mounds of yam per hectare (mounds ha⁻¹); Land position is the field crop position through the landscape (bottom of the slope, plateau, top of the slope with 3, 2 and 1 affected values respectively); Land use intensity is the intensity of land utilization indicating the number of cultivated fields around the four sides of the experiment plot (1 to 4).

Whereas average total cumulative rainfall ranged from 1024 to 1092 mm between sites (no significant) and from 797 to 1386 mm between years ($P < 0.001$). Farm and crop management also varied strongly between sites.

In the next paragraphs, these different systems are analyzed in more detail to evaluate which factors contributed to the observed yield variability.

3.2. Factors explaining yield variability

Yield variability at each yam-based system level was large. The ANOVA partial nested model showed that yam yield differed significantly depending on the factors Treatment ($P < 0.05$), Farmer ($P < 0.001$), and Replicate ($P < 0.001$). Year \times Treatment ($P < 0.01$), and Year \times Site ($P < 0.001$) interactions were significant (Chapter 3).

Tables 3 and 4 show the relationship with hypothesized sign between late maturing yam “Kokoro” (*Dioscorea rotundata*) yield and independent variables in the 2002-2003 and 2004-2005 cropping seasons in four villages in Benin.

Table 3. Relationship with hypothesized sign between late maturing yam “Kokoro” (*Dioscorea rotundata*) yield and independent variables in the 2002-2003 and 2004-2005 cropping seasons in Akpéro and Gbanlin in Benin

Site/ Dependent variable Y	Variable X	Unit	Sign	Mean Value	SD	Min	Max
Akpéro							
Y		t ha ⁻¹		13.9	5.1	5.4	22.9
	Biomass K	kg ha ⁻¹	+	35.1	16.5	13.4	66.0
	Land position		+/-	2	0.5	1	2
	Mound height	m	+/-	0.29	0.05	0.25	0.4
Gbanlin							
Y		t ha ⁻¹		11.2	4.6	3.5	20.0
	Biomass K	kg ha ⁻¹	+	40.2	19.5	16.3	69.8
	Land position		+/-	2	0	1	2
	Phosphorus	ppm	+	7.0	0.3	6.7	7.6
	Weeding		+/-	2	1	2	3
	Biomass N	kg ha ⁻¹	+	108.5	54.5	31.7	206.0
	Crop duration	days	+/-	327	30	304	365

Biomass K: Biomass Potassium content; Weeding: number of weedings; SD: Standard deviation;

Max: Maximum; Min: Minimum

Table 4. Relationship with hypothesized sign between late maturing yam “Kokoro” (*Dioscorea rotundata*) yield and independent variables in the 2002-2003 and 2004-2005 cropping seasons in Miniffi, Gomè and Overall sites in Benin

Site/ Dependent variable Y	Variable X	Unit	Sign	Mean Value	SD	Min	Max
Miniffi							
Y		t ha ⁻¹		10.9	4.5	1.8	22.4
	Biomass K		+	42.7	19.7	13.8	72.8
	SOM	%	+	1.1	0.2	0.9	1.5
Gomè							
Y		t ha ⁻¹		10.8	4.6	2.7	20.6
	Biomass	t ha ⁻¹	+	34.0	16.5	15.1	68.3
	Rainfall_0_6	mm	+-	356	1	354	357
	Density	moulds ha ⁻¹	+-	9519	309	9091	10000
Overall sites							
Y		t ha ⁻¹		11.7	4.9	1.8	22.9
	Biomass	t ha ⁻¹	+	7.2	2.8	2.3	12.3
	Biomass K	kg ha ⁻¹	+	38.0	18.4	13.4	72.8
	Rainfall_0_6	mm	+-	354	62	288	505
	SOM	%	+	1.3	0.4	0.7	2.5
	Land use intensity		-	3	1	1	4
	Crop duration	days	+-	312	44	275	396

SOM: Soil organic matter fraction; Rainfall_0_6: rainfall in first 6 months after planting;

Biomass K: Biomass Potassium content; Weeding: SD: Standard deviation; Max: Maximum; Min: Minimum

Important variables selected per site that explained yield were as follows: Akpéro (biomass K, mound height, and land position), Gbanlin (biomass K, land position, biomass N, crop duration, weeding, and phosphorus), Miniffi (biomass K and SOM) and Gomè (biomass K, rainfall_0_6, and crop density). Whereas organic biomass, rainfall_0_6, biomass K, SOM, land use intensity, and crop duration were important variables explained yields overall sites. Rainfall between the 0th and 6th month (Rainfall_0_6) was significantly correlated to the total cumulative rainfall (Rainfall_0_12) during the growth cycle ($R^2 = 0.320$; $P < 0.001$).

Whereas boundary lines could be identified under traditional conditions, or within sites, no functional relationships (i.e. boundary lines) could be derived under yam-based systems with herbaceous legumes (Figs. 1a-d and 2a-f). Improved rotations with legumes increased attainable yields from 13.5 to 22.9 t ha⁻¹.

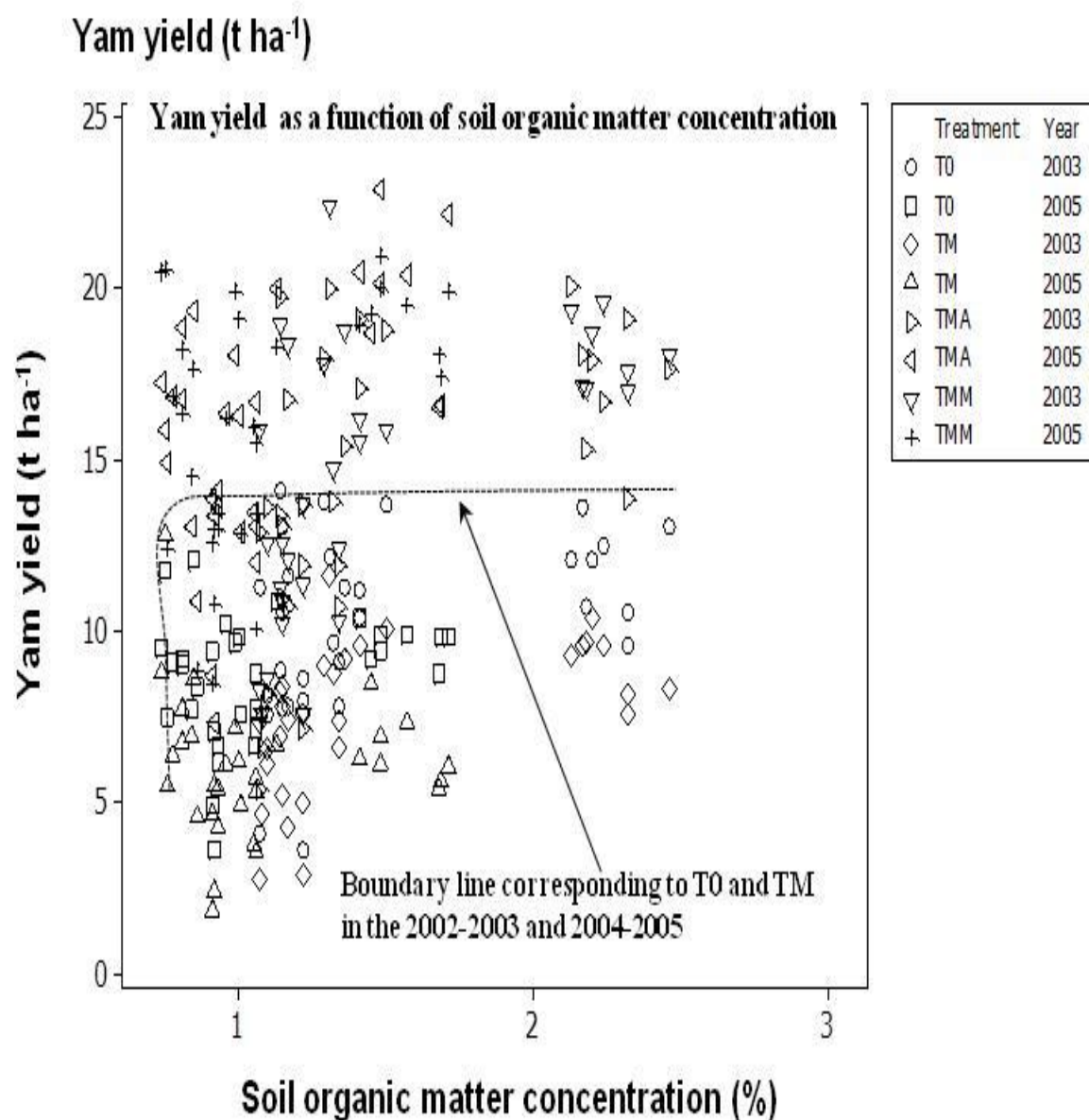


Fig. 1a

Fig. 1: Yam yield as a function of soil organic matter (SOM), soil phosphorus (P), rainfall, biomass K, weed management and organic biomass. The dotted lines were 'hand drawn' to represent the upper boundary of the observations corresponding to T0 and TM in the 2002-2003 and 2004-2005 cropping seasons: 1a: SOM; 1b: P; 1c: Biomass K ;1d: Rainfall_0_6; 1e: Weeding; 1f: organic biomass

Yam yield (t ha⁻¹)

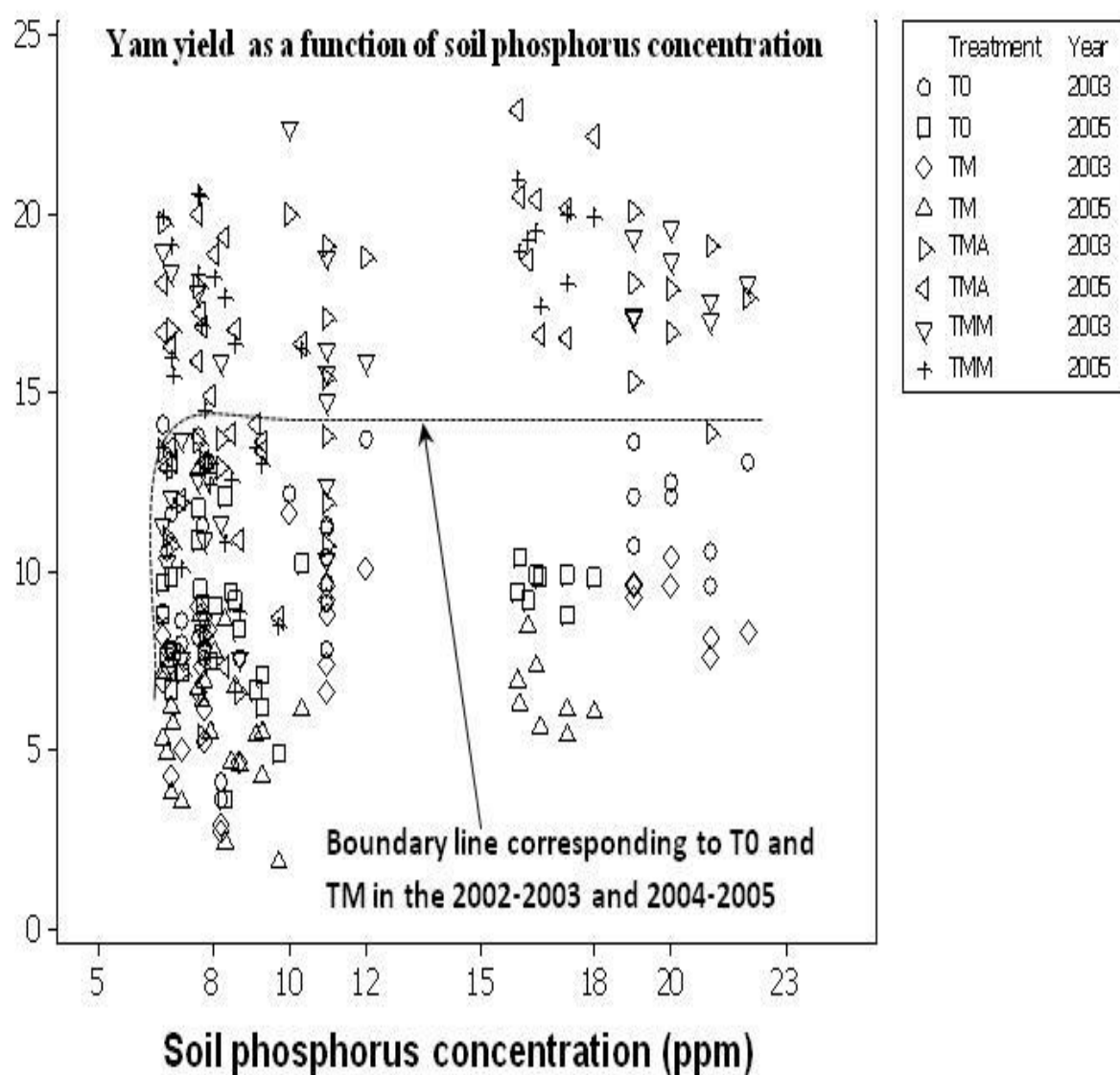


Fig. 1b

Yam yield (t ha^{-1})

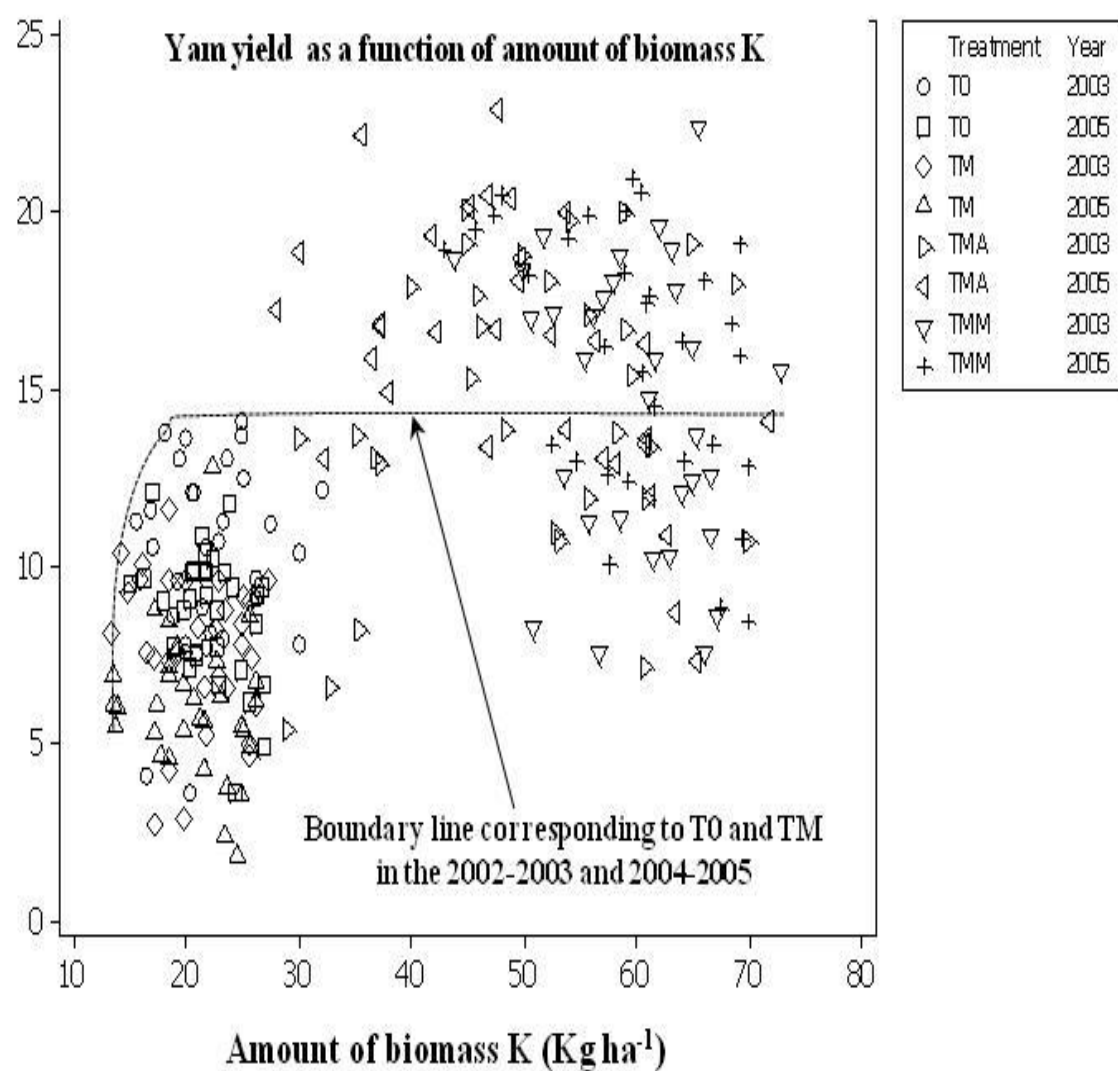


Fig. 1c

Yam yield (t ha⁻¹)

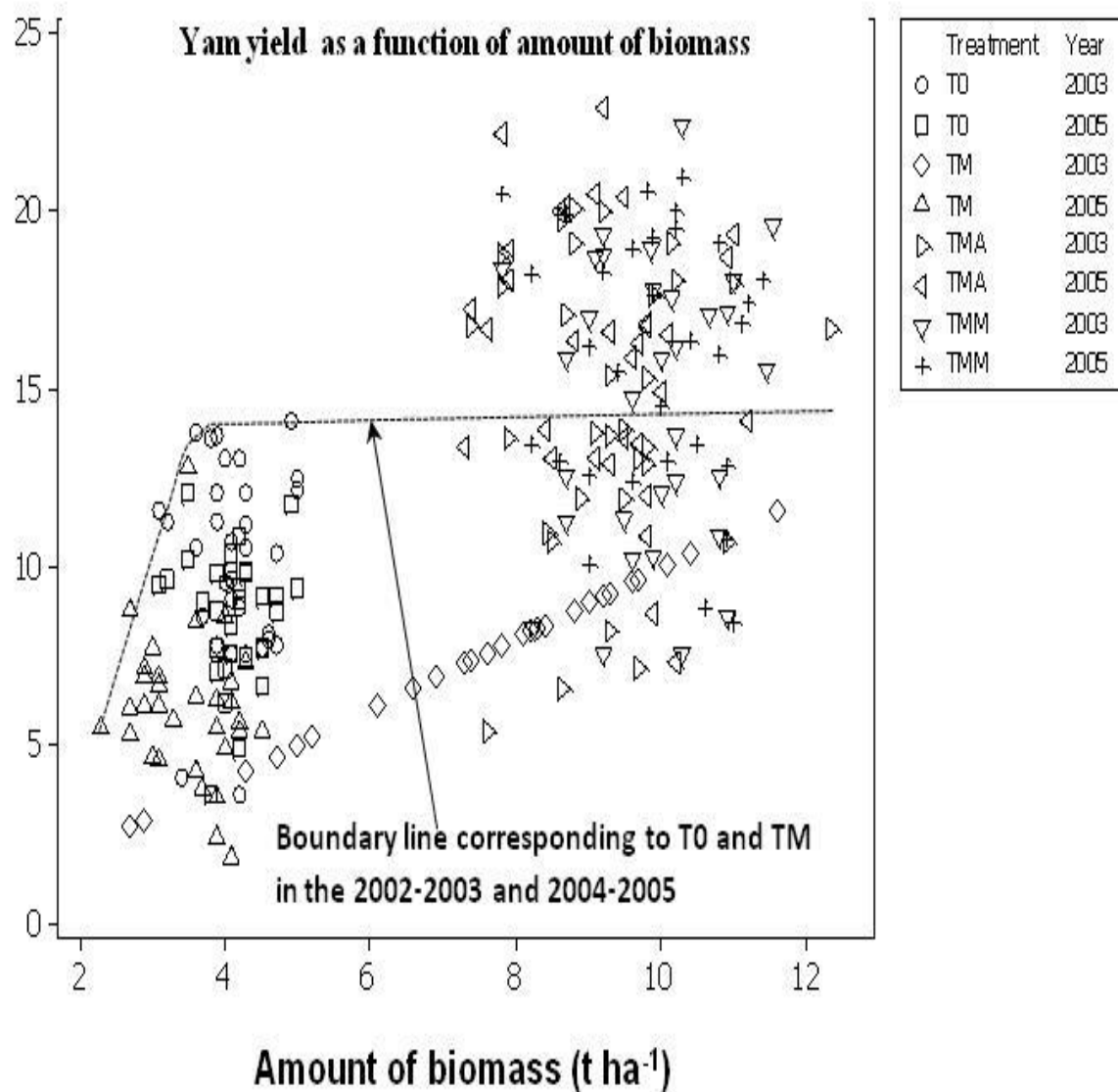


Fig. 1d

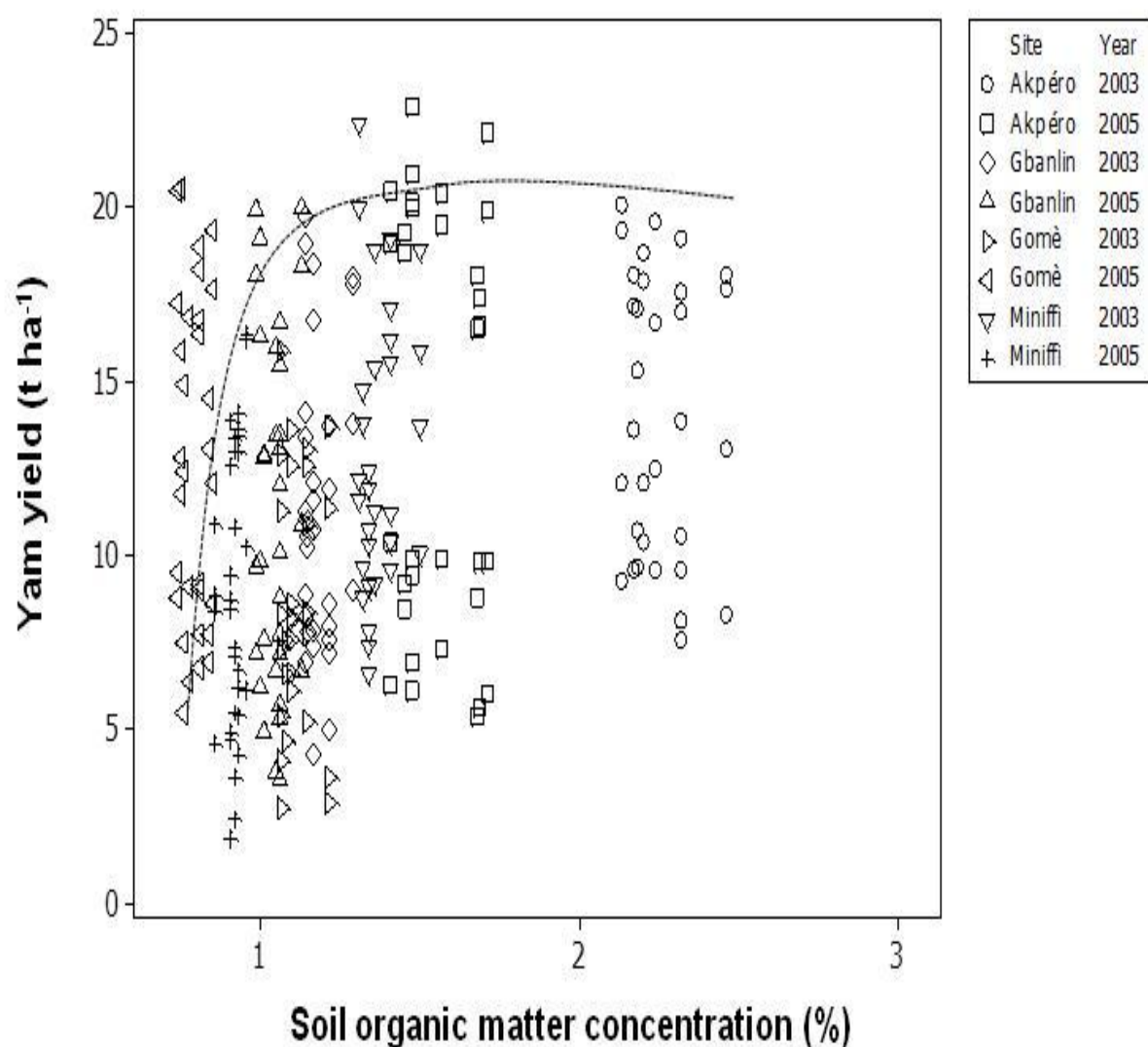


Fig. 2a: Soil organic matter concentration

Fig. 2. Yam yield as a function of soil organic matter (SOM), soil phosphorus (P), rainfall, biomass K, weed management and organic biomass according to the sites (Akpéro, Gbanlin, Miniffi and Gomè) in the 2002-2003 and 2004-2005 cropping seasons in Benin: Fig. 2a: SOM ; Fig. 2b: P ; Fig. 2c: Biomass K ; Fig. 2d: Rainfall_0_6 ; Fig. 2e: Weeding; Fig. 2f: organic biomass

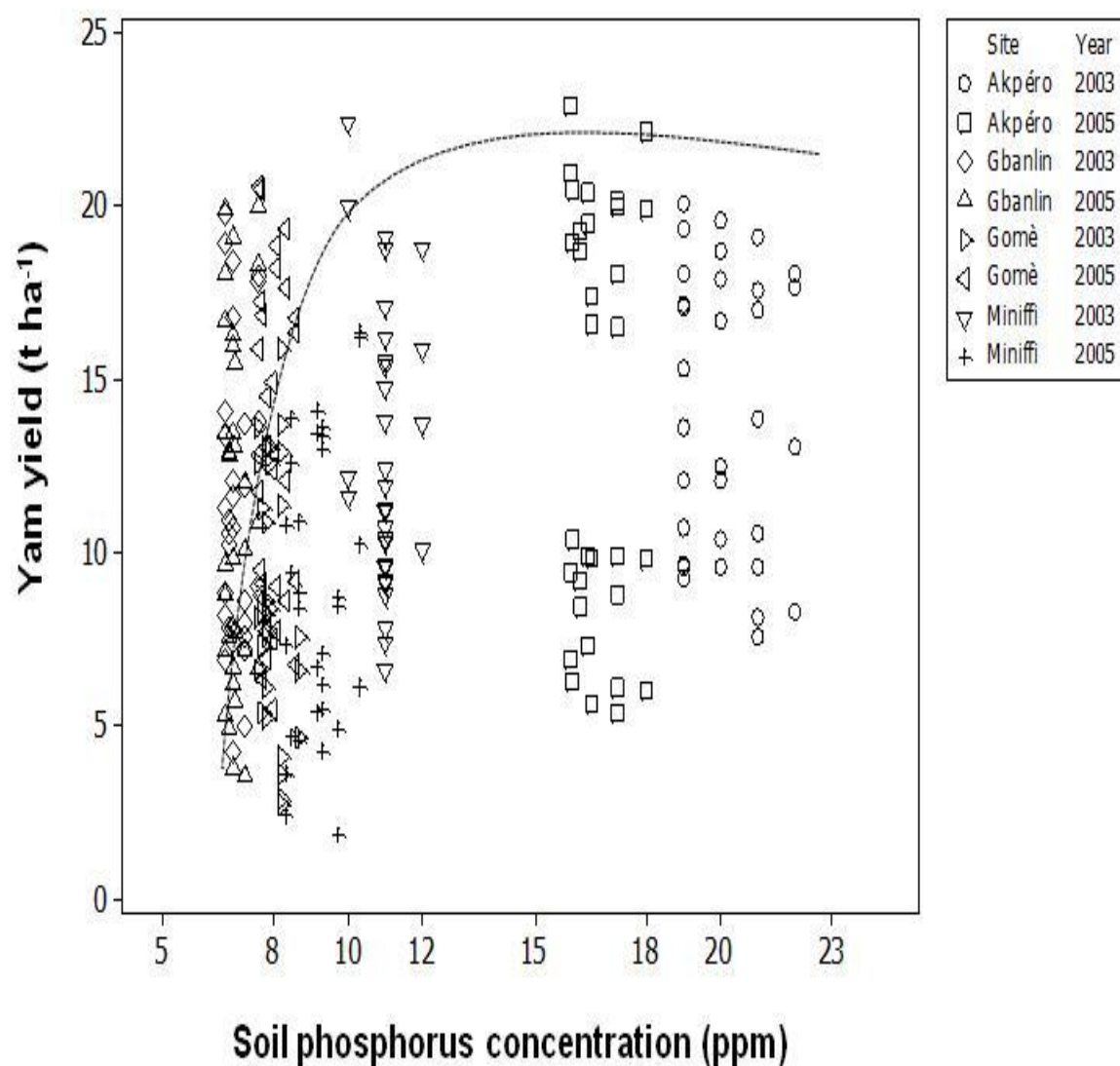


Fig. 2b: Soil phosphorus concentration

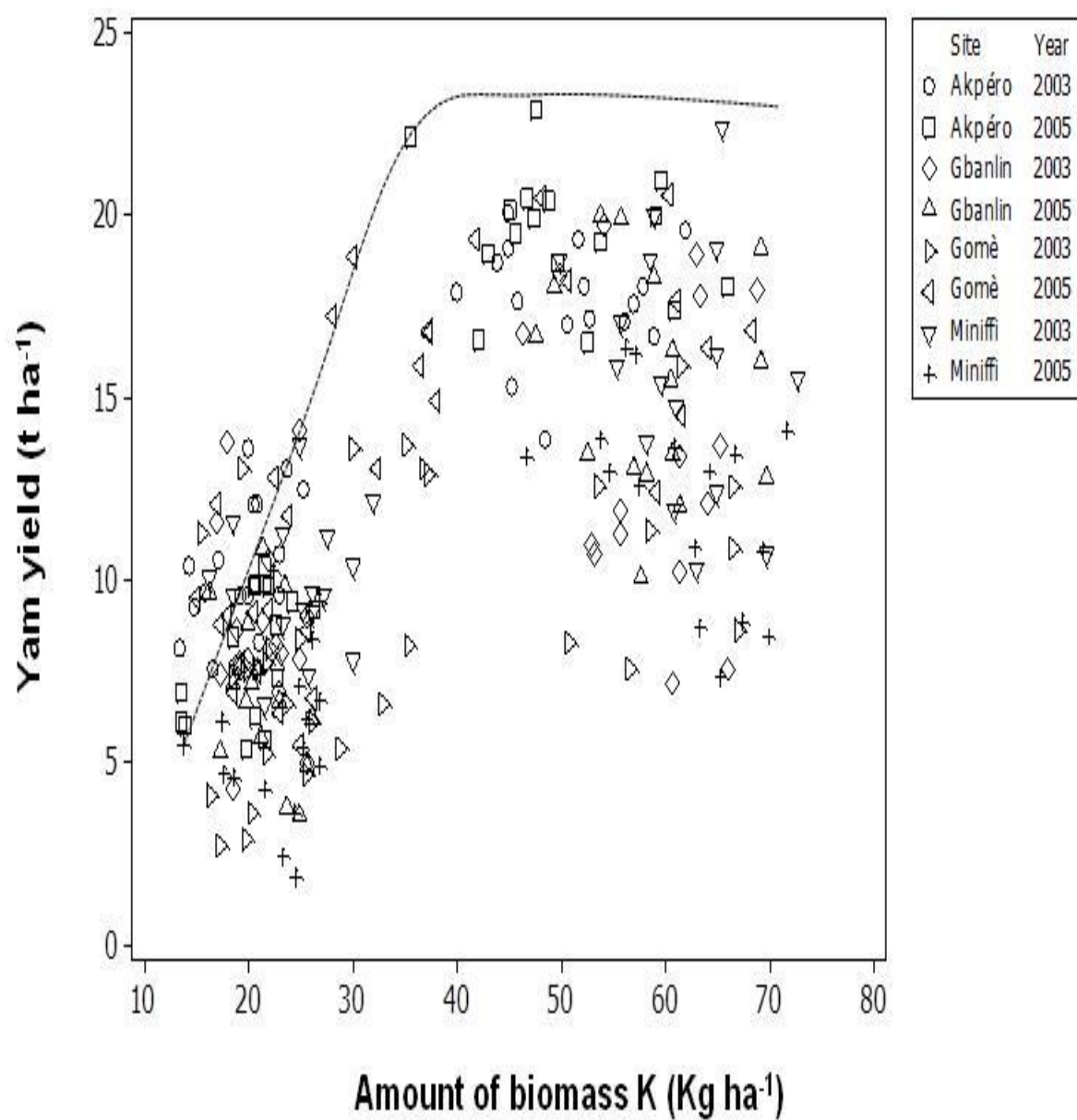


Fig. 2c: Amount of biomass K

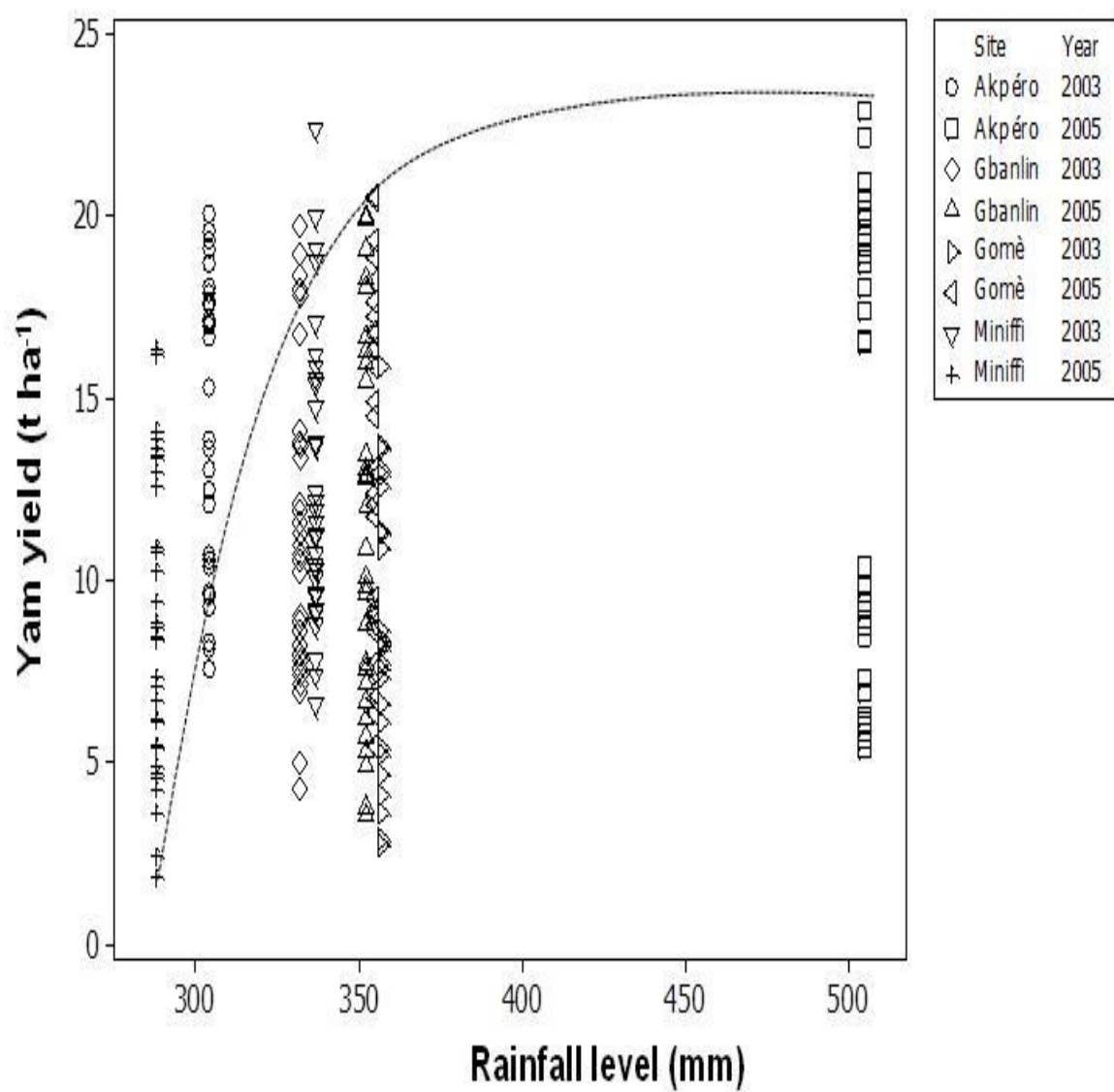


Fig. 2d: Rainfall during the first 6 months after planting

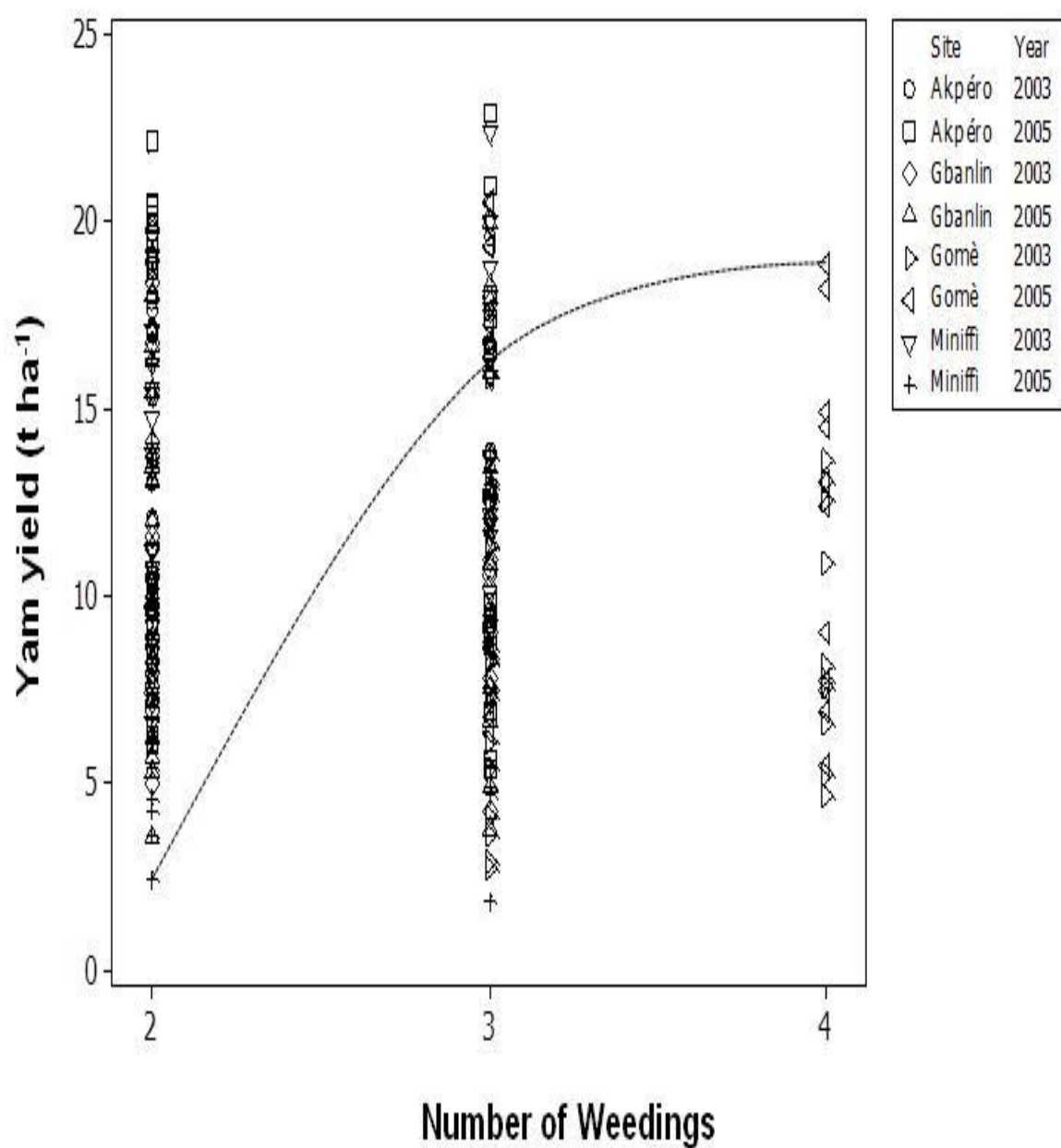


Fig. 2e. Weeding

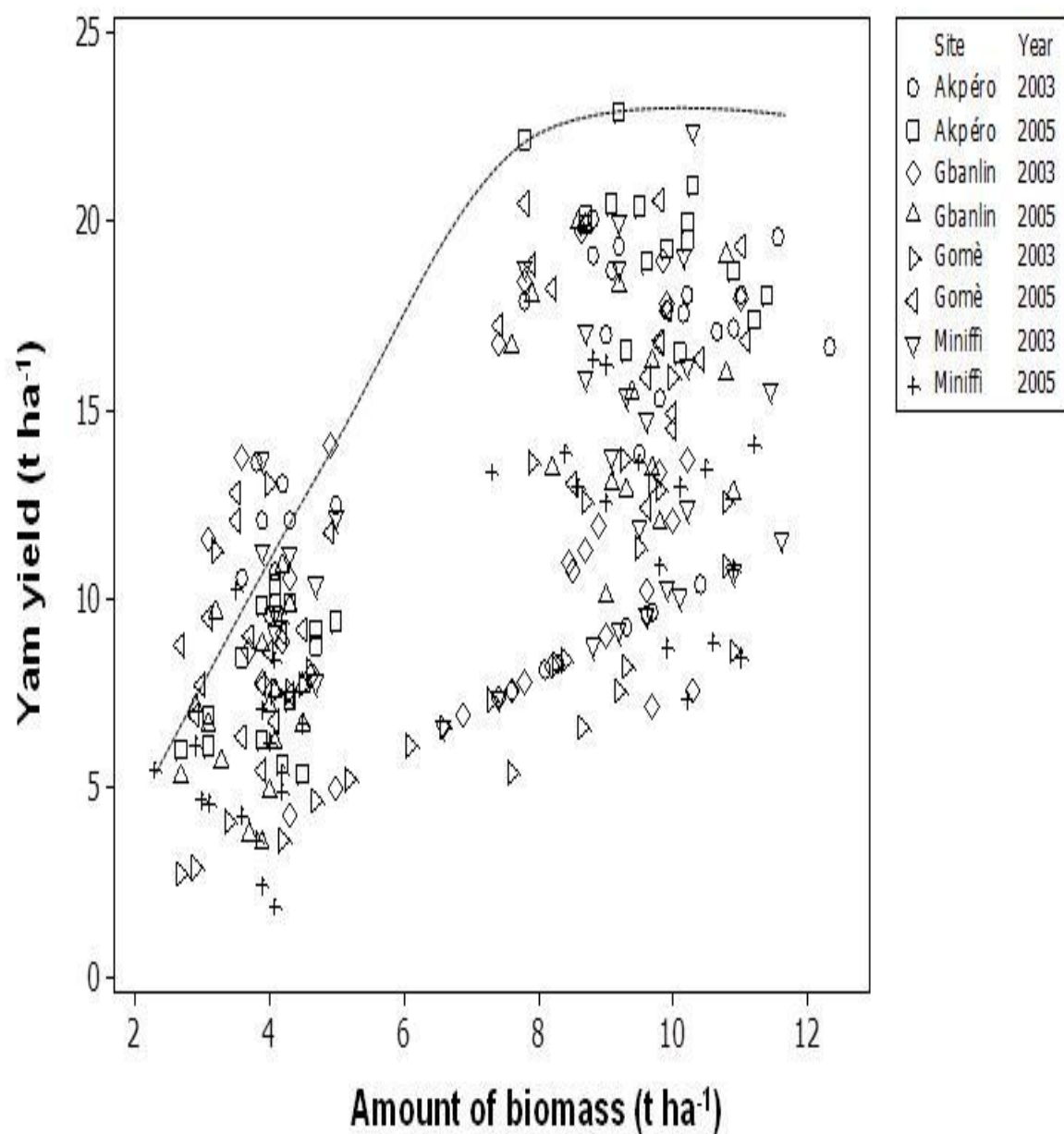


Fig. 2f. Amount of organic biomass

Tables 5 and 6 show regression coefficients of explanatory variables, their level of significance and percentage variance explained in the 2002-2003 and 2004-2005 cropping seasons in different villages and overall sites. The R^2 , R^2 adjusted and R^2 predicted for the models ranged 52 % to 79%.

Table 5: Regression coefficients of explanatory variables, their level of significance and percentage variance explained in Akpéro and Gbanlin in Benin

Site/Dependent variable	Predictor	Coefficient	T	P	Partial R-Sq %	% variance explained
Akpéro						
Y	Constant	17.010				
	Biomass K	0.275	15.13	0.000	0.77	75.04
	Land position	-2.2	-2.46	0.01	0.80	1.77
	Mound height	-31.8	-3.52	0.001	0.79	1.43
	R- Sq					79.66
	Adj R- Sq (%)					78.64
	Pred R- Sq (%)					77.07
	Fisher Coeff.					78.32
Gbanlin						
Y	Constant	-52.91				
	Biomass K	0.318	6.7	0.000	0.49	46.05
	Land position	-10.1	-7.61	0.000	0.58	8
	Phosphorus	4.9	4.05	0.000	0.76	6.94
	Weeding	4.21	4.34	0.000	0.73	6.03
	Biomass N	-0.056	-3.32	0.002	0.68	4
	Crop duration	0.098	5.75	0.000	0.72	2
	R- Sq					76.38
	Adj R- Sq (%)					73.89
	Pred R- Sq (%)					70.15
	Fisher Coeff.					30.72

Fisher Significant Level. ($P < 0.001$)

R-Sq: R square; Partial R-Sq: Partial R square; Adj R- Sq: Adjusted R square; Pred R- Sq: Predicted R square; Fisher Coeff.: Fisher Coefficient

Table 6: Regression coefficients of explanatory variables, their level of significance and percentage variance explained in Miniffi, Gomè and overall sites in Benin

Site/Dependent variable	Predictor	Coefficient	T	P	Partial R-Sq %	% variance explained
Miniffi Y	Constant	-5.40				
	Biomass K	0.147	8.15	0.000	0.62	40.60
	SOM	8.8	5.79	0.000	0.62	20.43
	R- Sq					62.27
	Adj R- Sq (%)					61.03
	Pred R- Sq (%)					58.64
	Fisher Coeff.					50.34
Gomè Y	Constant	698.833				
	Biomass	1.09	8.91	0.000	0.66	38.54
	Rainfall_0_6	-1.89	-6.58	0.000	0.66	24.11
	Density	-0.0024	-2.12	0.03	0.66	2.02
	R- Sq					66.35
	Adj R- Sq (%)					64.67
	Pred R- Sq (%)					61.82
	Fisher Coeff.					39.44
Overall sites Y	Constant	-6.535				
	Biomass	0.398	2.89	0.004	0.50	40.13
	Biomass K	0.125	5.88	0.000	0.53	3.74
	Rainfall_0_6	0.015	4.35	0.000	0.52	3.48
	SOM	3	4.81	0.000	0.53	3.4
	Land use intensity	-0.77	-2.63	0.009	0.53	0.74
	Crop duration	0.0131	2.21	0.028	0.53	0.74
	R- Sq					53.35
	Adj R- Sq (%)					52.23
	Pred R- Sq (%)					50.84
	Fisher Coeff.					47.47

Fisher Significant Level. ($P < 0.001$)

SOM: Soil organic matter; Rainfall_0_6 : Rainfall during the first 6 months after yam planting

R-Sq: R square; Partial R-Sq: Partial R square; Adj R- Sq: Adjusted R square; Pred R- Sq: Predicted R square;

Fisher Coeff.: Fisher Coefficient

The Fisher test of the models was significant ($P < 0.001$). Of the 52% yield variability explained by the linear model for the entire data set, approximately 47% of the explained variability was associated with soil fertility (organic biomass, biomass K, and SOM), while the variables pertaining to rainfall (rainfall_0_6) and crop management (crop duration and

land use intensity) explained the remaining variability in approximately 5%. Of the 78.6% yield variability explained by the Akpéro model, about 75% was associated with Biomass K, and the rest with crop management variables, notably with mound height and land position. While of the 74% yield variability explained by the Gbanlin model, about 57% was associated with soil fertility (biomass K, biomass N, and phosphorus). Of the 61% of yield variability explained by the Miniffi model, most was associated with soil fertility (Biomass K and SOM).

Whereas of 62.0% of yield variability explained by the Gomè model, about 38.5% was associated with the soil fertility variable (Biomass K), about 24% was associated with cumulative amount of rainfall in the 6th month of the yam growing period, and the rest with the crop management variable (crop density).

3.3.Factors contributing to yam yield gaps

The observed attainable yield at improved systems levels was 22.9 t ha^{-1} . Among different sites, Gomè showed the highest gap with various variables in 2003, while Miniffi showed the highest in 2005 (Figs. 3a-b).).

Yam yield gap (t ha^{-1})

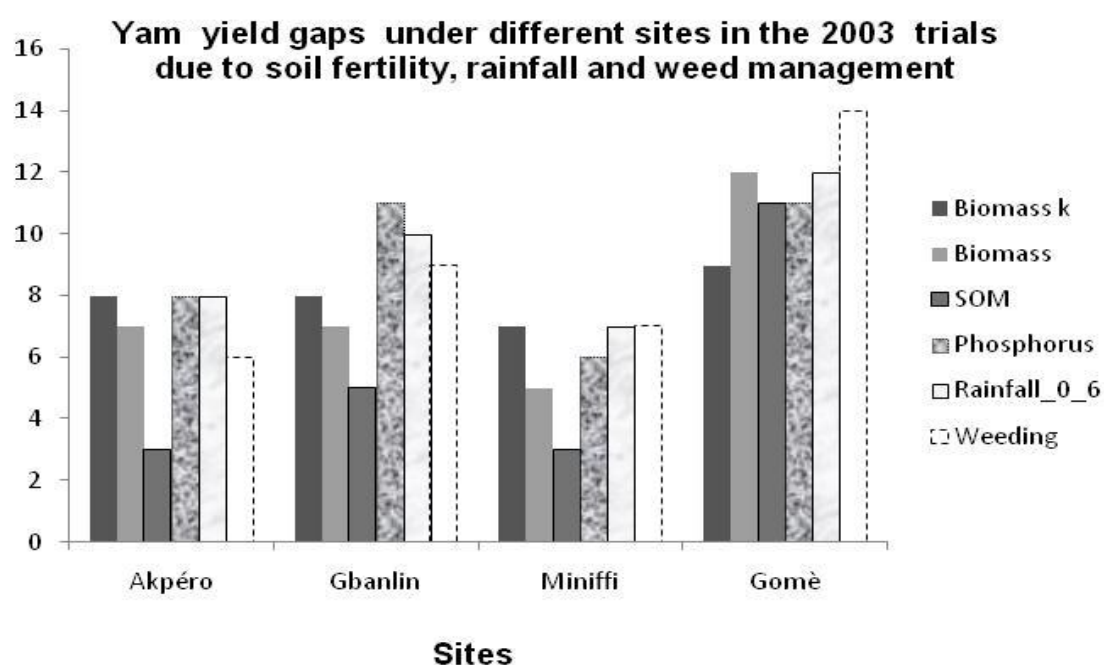


Fig. 3a.

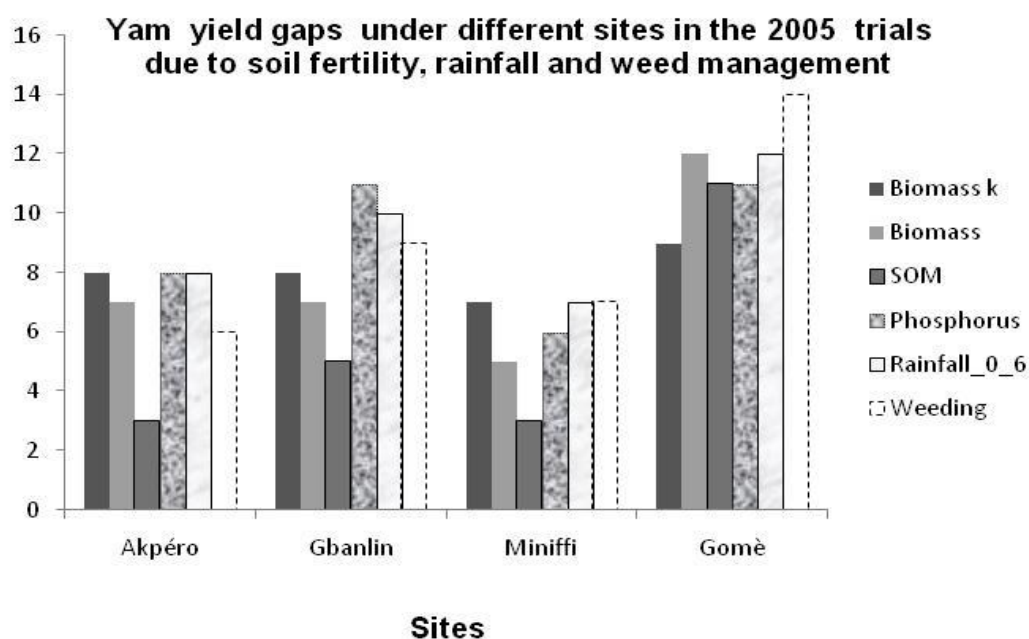
Yam yield gap (t ha⁻¹)**Fig. 3b**

Fig. 3. Identified yield gaps for yam planted under different sites in the 2003 and 2005 trials due to soil fertility, rainfall and weed management constraints. Yam yield gaps are based on the multivariate boundary line model

SOM and soil phosphorus limited yields by average differences ranged from 3 to 13 t ha⁻¹ with the attainable yield in both cropping seasons, whereas organic biomass and biomass K were from 5 to 12 t ha⁻¹. Rainfall limited yields by average differences ranged from 7 to 13 t ha⁻¹ with the attainable yield, whereas weed management caused average yield gaps ranged from 4 to 14 t ha⁻¹.

Yam yield gaps ranged from 3 to 14 t ha⁻¹. Soil fertility conditions (biomass K, soil organic matter, organic biomass, and soil phosphorus), cumulative amount of rainfall at least in the 6th month of the yam growing period and crop management (land use intensity, mound height adapted to seed yam size, early yam planting and 2-4 times of weeding) as important factors to yam production (Figs. 1a-d and 3a-b).

In addition, according to different variables (Biomass K, Biomass, SOM, Nitrogen, Rainfall and weeding), average yam yield gaps under different treatments in the 2003 and

2005 ranged from 9 t to 15 t ha⁻¹ on traditional systems (T0 and TM) against ranged from 2 t to 6 t ha⁻¹ on yam-based cropping systems with legumes (TMA and TMM) (Fig. 4)

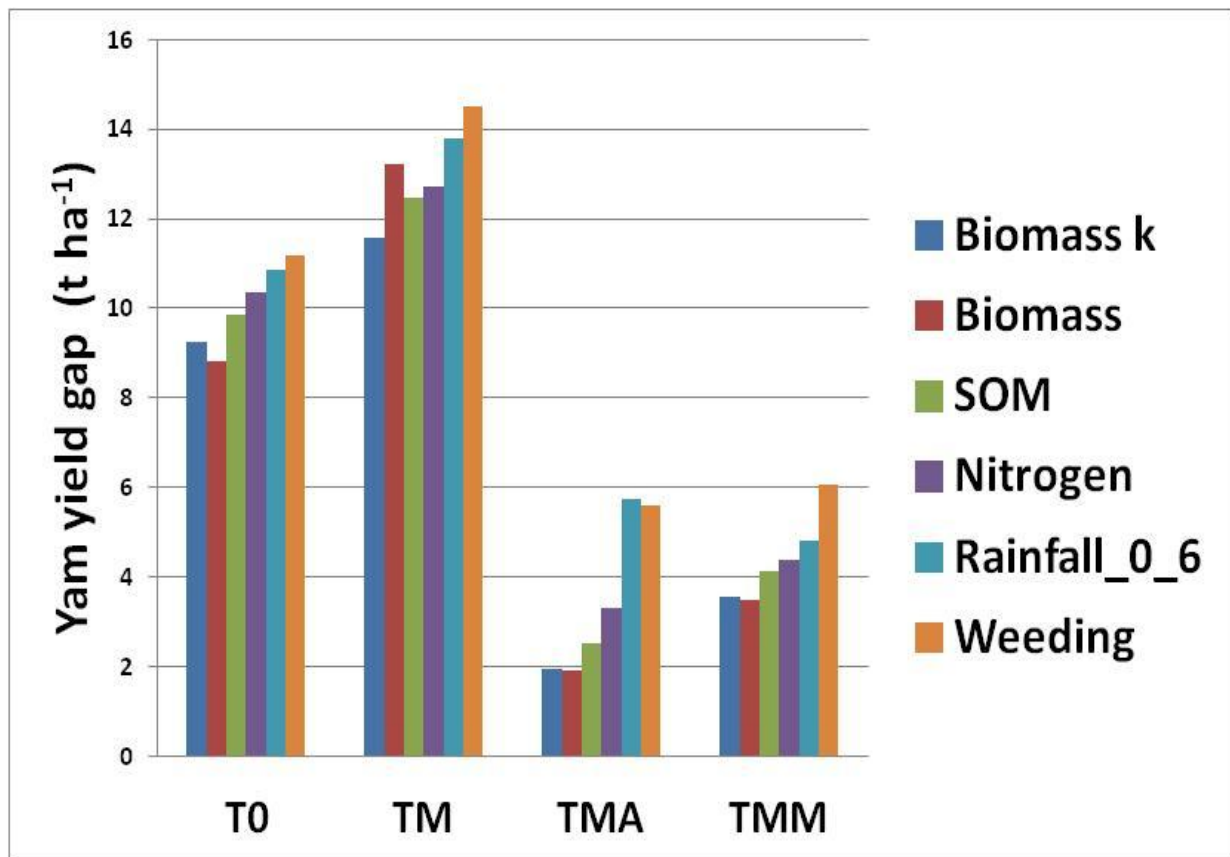


Fig. 4: Yield gaps under different yam-based croppings systems in the 2003 and 2005 trials due to soil fertility, rainfall and weed management constraints. Yam yield gaps are based on the multivariate boundary line model

Legend: T0: 1-year fallow of *Andropogonon gayanus* -yam rotation; TM: maize-yam rotation, TMA: intercropped *Aeschynomene histrix* with maize-yam rotation; TMM: intercropped *Mucuna pruriens* with maize-yam rotation; SOM: soil organic matter.

In yam-based cropping systems with legumes, yields variability on the one hand, the gap to optimum yields on the other hand are reduced (Figs. 1a-d and 4).

4. Discussion

4.1. Soil fertility contribution to the models

Within the agro-ecological conditions prevalent during our trials, the linear regressions and boundary line analyses all identified soil fertility conditions (biomass K, SOM, organic biomass, and phosphorus) as important factors to yam production. The importance of soil fertility conditions as a major yield limiting factor is well illustrated by the significant response to fertilization (TMA, TMM) which over-ruled yield differences between sites. Year \times Treatment and Year \times Site interactions could lead to a synergetic effect on yam yields.

Soil organic matter and legumes/maize biomass incorporated into the soil explained by 20 and 40 % yam yield variations at Miniffi and Gomè respectively. Legumes/maize biomass concentration in potassium (K) incorporated into the soil explained by 40 to 75 % yam yield variations on Miniffi, Gbanlin and Akpéro sites. Globally, results of regression analysis showed that an increase by 1 % of the initial soil organic matter amount contributed to the enhancement of yam fresh matter (FM) by 3 t ha⁻¹. On Miniffi site, in particular, variation of 1 % of the soil organic matter increased yam yields by 8.8 t ha⁻¹ (FM). An increase by 1 % of soil phosphorus (P) concentration on Gbanlin site enhanced yam yield by 4.9 t ha⁻¹ (FM). In addition, 1% of variation of legumes/maize organic biomass applied increased yam yield by 0.4 t ha⁻¹ FM on all sites and by 1 t ha⁻¹ FM on Gomè site. A variation of 1 % of potassium concentration in legumes/maize biomass enhanced yam yield by 0.125 t ha⁻¹ (FM) on all sites.

These results confirm the well-known importance of the soil organic matter for yam production. Organic materials supplied contribute directly to the building of SOM, which itself performs diverse functionary roles in improving the physical, chemical and biological composition of the soil (Sanginga and Woome, 2009). Soil phosphorus contributed positively to the yam yield formulation. Legumes fallows with *Mucuna*, is known especially for increasing the available P fractions in the soil for subsequent crops (Salako and Tian, 2003). In fact, *Mucuna* root exudates could solubilize P increasing its availability.

4.2. Rainfall contribution to the models

Rainfall, either during the first 6 months after planting or during the total crop cycle, was identified as an important factor explaining yield variability on different sites in the boundary line analysis, and as the overall third most important constraint in the linear regression analysis (Figs. 2a-b; Tables 5 and 6). Dansi et al. (2003) reported, yam requires a lot of water especially after crop germination and then between the 14th and 20th weeks of vegetation. However, Gomè in lowland showed a negative effect of rainfall on yam yield. In

fact, in Gomé there are more poorly drained soils among the fields selected for the experiment.

4.3. Crop management contribution to the models

Land use intensity affected negatively yam yield in entire data set on different sites. Because of soil fertility degradation which should be related to the soil organic matter decrease that leads to nutrient depletion (nutrients removed in the crop harvest, leaching and erosion). Diby et al. (2009) observed the effect of land use intensification in the yam yield decline. Amede (2003) and Henao and Baanante (2006) reported that the main factors contributing to soil nutrient depletion through physico-climatic processes in tropical Africa and particularly in sub-Saharan Africa, are generally loss of nitrogen (N) and phosphorus (P) through wind and water erosion; as well as leaching away of N and potassium. There is in the study area large influx of migrants from the northern and southern region of the country where farmers are running away from soil degradation and nutrient depletion (Mulder, 2000). While migration may be a novel social strategy that releases pressure on the land in one area, it may simultaneously increase pressure on the land and on social relationships (insecure land tenure) elsewhere. Insecure land tenure encourages soil-mining practices, which reduce the long-term productivity of the land (Saidou, 2006). With increasing demographic pressure in central Benin, land use intensity and reduced forest cover, suitable land for yam cultivation becomes gradually scarcer with a negative impact on yam yield (Carsky et al., 2001). Diby et al. (2009) observed the effect of land use intensification in the yam yield decline. Soil nutrient depletion and likely degradation have been considered serious threats to agricultural productivity and have been identified as major causes of decreased crop yields and per capita food production in sub-Saharan Africa (Henao & Baanante 2006).

Weed management was identified as an important factor explaining yield variability on different sites in the boundary line analysis and its importance varied regardless of the sites and years (Figs. 3a-b). The sensitivity of the crop to undesirable weeds appeared maximum between two and three months after yam germination (Beale et al., 1988). Although three weed operations per growing cycle are recommended, farmers in our study weeded their fields on average 2–4 times. Other crop managements (crop duration, crop density, and mound height) affected yam yields in linear regression models. Crop duration (the number of days between yam planting and harvesting) affected positively yields in Gbanlin and in overall sites models. In fact, the early yam planting could allow the crop to profit

progressively from available nutrients released through the organic material decomposition in comparison with the late planting. Rotations with *M. pruriens* and *A. histrix* contribute to nutrient release for subsequent crop (yam) through their faster decomposition. Adjei-Nsiah et al. (2007) indicated that only 30% of *M. pruriens* litter remained six weeks after the incorporation of biomass. Crop density in Gomè model ranging from 9091 to 10000 mounds ha⁻¹ could affect negatively yields because of the sensitivity of the crop to hydromorphy and the more poorly drained soil of the site (located in lowland soils) compared to others. The mounds heights ranged 0.30 to 0.90 m in the study area and ranged 0.80 to 0.90 m at Gomè in order for smallholders to control water and avoid tubers damage. In addition, land position affected negatively yam yields in Akpéro and Gbanlin models. This could be due to the nutrients leaching and erosion regardless of the plots location through the landscape. Gbanlin in particular is located on an undulating plateau.

4.4. Performance of linear regression and boundary line approaches

Whereas linear regression models allowed us to identify overall trends for the whole study taking into account variable interactions, the boundary line approach identifies limiting factors for each individual field while ignoring interactions. Both approaches ascribed different degrees of importance for soil fertility conditions (biomass K, organic biomass, SOM and phosphorus), rainfall and weed management as yield-determining factors. The importance given to variables in the linear regression or boundary line models depended on whether or not the variables showed significant linear correlations with yield or clear boundary lines. In such cases, the explanatory power of a linear regression analysis and the explaining power of a boundary line approach, which identifies the maximum yield at each given level of an independent variable, are useful and complementary. Both approaches performed greatly with different sites data set.

5. Conclusions

The present study was conducted to discriminate the relative importance of soil fertility, crop management and climate factors in determining yield variability and the gap between farmers' yam yields and attainable yields in the Guinea-Sudan transition zone of Benin (West Africa). Our results show: (1) improved rotations with legumes increased attainable yields

from 13.5 to 22.9 t ha⁻¹; (2) yam yield gaps ranged from 3 to 14 t ha⁻¹; (3) soil fertility conditions (biomass K, soil organic matter, organic biomass, and soil phosphorus), crop management (land use intensity, weeding, crop duration, crop density, and mound height) and cumulative amount of rainfall in the 6th month of the yam growing period as important factors to yam production. Therefore, the potential to increase yam yield will depend on the capacity to restore their soil fertility with improved rotations through an adequate crop management (mound height adapted to seed yam size, early yam planting, 2-4 times of weeding) and make water available in the 6th month of the yam growing period for a better tuber performance. Understanding the relative importance of these factors to the yield gap is a necessary step to guide the design of relevant research for development interventions aimed at improving yam productivity. The application will allow to natural resources better preserved, greenhouse gas emissions in land/soils to be reduced, or soil capacity to act as a carbon sink to be enhanced.

The chapter 2.5 examines with end-users, constraints degree of severity of yam-based cropping systems with legumes promoted by the research and participatory solutions in order to improve policy transacting in rural areas for sustainable yam-production.

**Contingent constraints of soil conservation innovations:
case of yam-based systems with herbaceous legumes in the
Guinea-Sudan transition zone of Benin**

R. Maliki, B. Sinsin, A. Floquet, L. Parrot

Global Journal of Environmental Research, 5(3): 118-128 (2011)

Chapitre 2.5.

Contingent constraints of soil conservation innovations: case of yam-based systems with herbaceous legumes in the Guinea-Sudan transition zone of Benin

Abstract

One of the most serious problems of farming systems in West Africa is the excessive reduction of agricultural productivity related to the “slash and burn” and shifting cultivation systems. With the aim of designing more sustainable yam cropping systems, the agronomic research organization in Benin implemented alternative systems including herbaceous legumes (*Aeschynomene histrix* and *Mucuna pruriens* var *utilis*). This study examines with end-users in the framework of focus group discussions and household-level surveys including 306 farm households, constraints degree of severity of yam-based cropping systems and participatory solutions in order to improve policy transacting in rural areas for sustainable yam-production. The results showed significantly high constraint degree of severity for herbaceous legumes biomass incorporation with *Mucuna* (52%) and *Aeschynomene* (46%) during household-level survey and 82% for both legumes during focus group discussions. Crop competitions, field access difficulty (with *Mucuna*), animal divagation, fertilizer cost, biomass burn, seed consumption, market and grains harvest (with *Aeschynomene*) were additional constraints in low and relatively high population density zone. On the seed production plot, the biomass of *Aeschynomene* at senescence could be shaken within basins to collect easily the seeds and avoid loss. The mixture of *Aeschynomene* seeds with dry sand (3/4 sand - 1/4 seeds) solves the problem of planting small seeds. Before the legumes reach the physiological maturity, three-quarters of biomass could be manually incorporated into the soil before the dry season during ridging and the remaining biomass could be left on the surface as mulch in order to reduce the workload related to the biomass incorporation into the soil. The practice of fire wall and fire of reference around the plot is necessary to avoid the burn of the mulch in the dry period. *Mucuna* seeds valorisation could contribute to smallholders' households incomes. Animal feeding with *Mucuna* grains deserves to be more investigated. The crop-livestock integration with these herbaceous should be an opportunity for yam production because of agro pastoral potential in the Guinea-Sudan transition zone of Benin.

Keywords: *Dioscorea rotundata*; Herbaceous legumes; Constraint degree of severity; Contingent ranking

Introduction

Yam (*Dioscorea* spp.) is a tuber crop that is widely cultivated in the humid and sub-humid lowland regions of West Africa and the Caribbean (Onwueme and Haverkort, 1991). More than 90% of world yam production (40 million metric tons of fresh tubers/year) is in West Africa (FAOSTAT, 2009). Yam is grown in traditional cropping systems as the first crop after virgin forest or after a long fallow period yielding about 10 t of fresh tubers ha⁻¹ year⁻¹ (Carsky *et al.*, 2001). But when the soil fertility is high, the potential yield of species *Dioscorea rotundata* (*D. rotundata*) can easily reach 25-30 t ha⁻¹ (Vernier and Dossou, 2000). The increase in yam production has been due more to land expansion than to crop improvement potential (FAO, 2003). For example, the production increase of 7.6% in West Africa was mainly due to an increase in area of 7.2% and only 0.4% was due to an improvement in crop productivity itself (FAO, 2003).

Yam is a demanding crop in terms of organic matter and soil fertility (Frossard, 2009), especially the most appreciated and market-valued cultivars (early maturing *D. rotundata*) used for the popular dish called *Fufu* (pounded yam) (Vernier and Dossou, 2003). Yam cultivation in West Africa is now confronted with the scarcity of fertile soil available for clearing (Cornet *et al.*, 2006). In Benin nowadays, farmers hardly have the possibility to rely on long duration fallow (Cornet *et al.*, 2006) and yam is being more and more cultivated in 1 or 2-year herbaceous fallow–yam or maize-yam rotation systems with manual incorporation of residue into the soil (Doumbia, 2005). Smallholder farmers removed important quantities of nutrient from their soil without applying sufficient quantity of manure or fertilizer to replenish the soil (Saidou, 2006).

With the aim of designing more sustainable yam cropping systems, the agronomic research organization in Benin implemented alternative systems including herbaceous legumes (*Aeschynomene histrix* and *Mucuna pruriens* var *utilis*). Studies were carried out on constraints of agricultural innovations for soil conservation (Battershill and Gilg, 1997; Deffo *et al.*, 2002; Deffo *et al.*, 2004; Adjei-Nsiah *et al.*, 2007). Nevertheless, such have been generally grain-oriented (cereals, legumes) and very little has been done on root and tuber crop based systems (Cornet *et al.*, 2005).

This paper examines constraints degree of severity of improved yam-based systems with herbaceous legumes. The paper is an empirical contribution to the constraints literature and provides valuable pointers for the design of effective public policies for promoting yam-based systems including herbaceous legumes for sustainable production. In section 1, we present the process of innovations introduction, the study area and the yam-based systems recommended to farmers. In section 2 we describe the survey methodology. In sections 3 and 4, results are presented and discussed.

Background

Process of diffusion of innovations

Herbaceous legumes were introduced in 1990 in the Guinea-Sudan transition zone of Benin to improve farming systems. Technologies for yam-based cropping systems and soil conservations are transferred to farmers by way of participatory training, farmer field schools (FFS) and visits in close partnership with extension workers. The results of research are presented in the framework of village restitution. Successful outcomes observed by each farmer in a particular field help to increase participation by the remaining farmers. Field training and visits are organized to document different points of view by farmers, extension workers and researchers. A scientific workshop is organized for researchers from the National Agricultural Research System (SNRA), who present and discuss the results of their research (Arodokoun, 2004). Major research findings are communicated to the Regional Research and Development Committee (CRRD), the main link in the agricultural research management cycle in Benin. Some 50% of farmers and end users of the technologies are members of the CRRD, the remaining 50% being researchers, intermediate users such as the Regional Centre for Agricultural Development (CeRPA), NGOs, development partners and political decision makers. The research results are presented in simple and accessible form during the forum and are discussed with the participation of farmers. The CRRD forum can transfer the best and most affordable results in terms of technical and economic performance to extension services for widespread promotion of the adopted technologies. After fine-tuning of the technologies, a manual is drafted in a multi-field and multiinstitutional approach in collaboration with farmers, researchers and the extension structures. The document proposes a technical road map with illustrations, comments and discussion of the economic issues. This technical and economic reference (RTE) for yam-based cropping systems with legumes is written in French, and local languages (Fon, Yoruba, Bariba and Peulh) for farmers, agricultural professionals, extension workers and researchers for dissemination and promotion of the new technologies (Maliki *et al.*, 2005, 2007a, 2007b, 2007c, 2007d, 2007e, 2007f) (Figure 1).

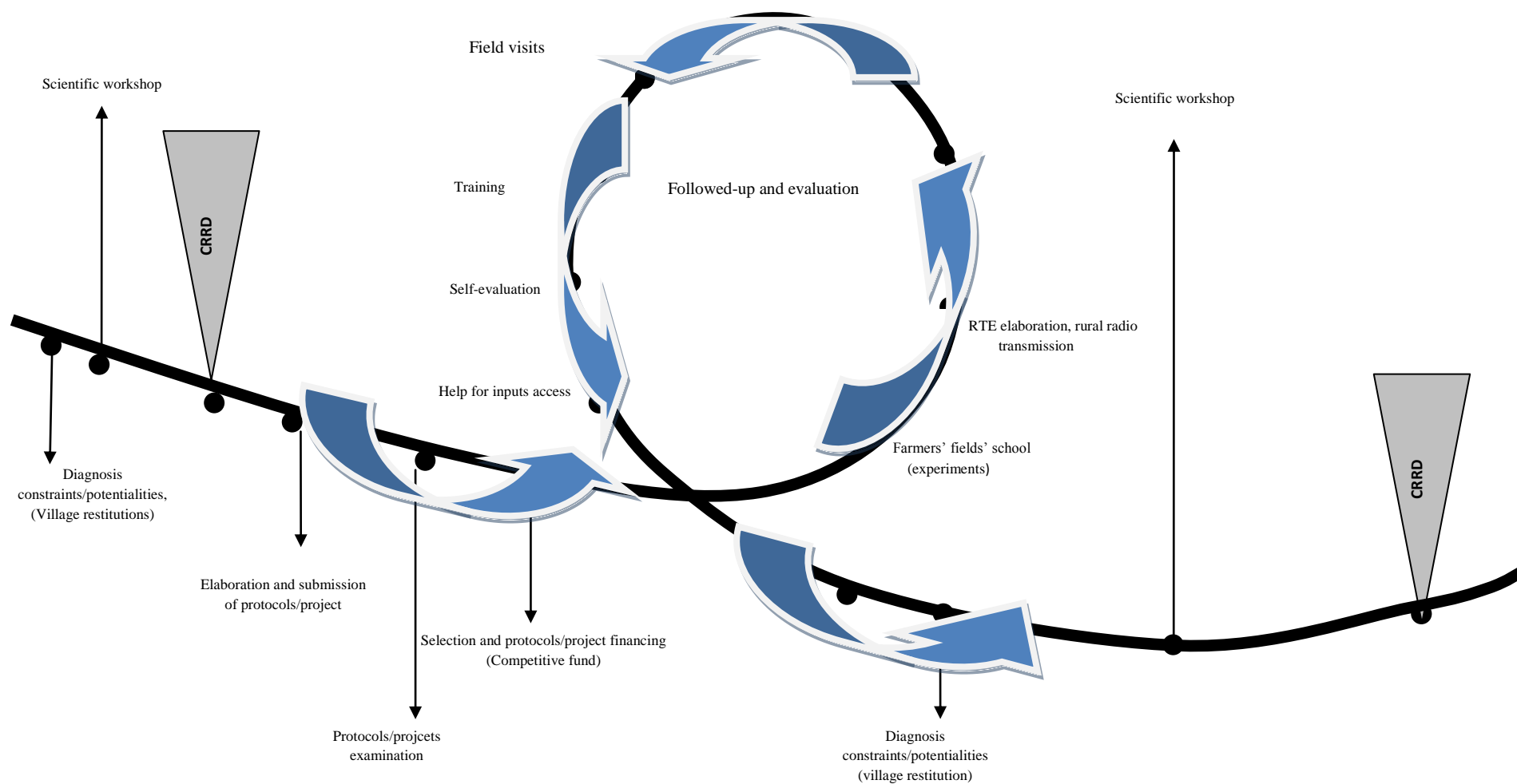


Figure 1: Adapted of annual cycle of Research and Development (R&D) for yam based technologies

Source: Arodokoun *et al.*, 2004

Study area

The study was carried out in 2005 in the Guinea-Sudan transition zone of Benin in a low (Savalou, Bantè, Savè and Ouessè) and in a relatively high population density zone (Dassa-Zoumè, Glazoué) (Figure 2).

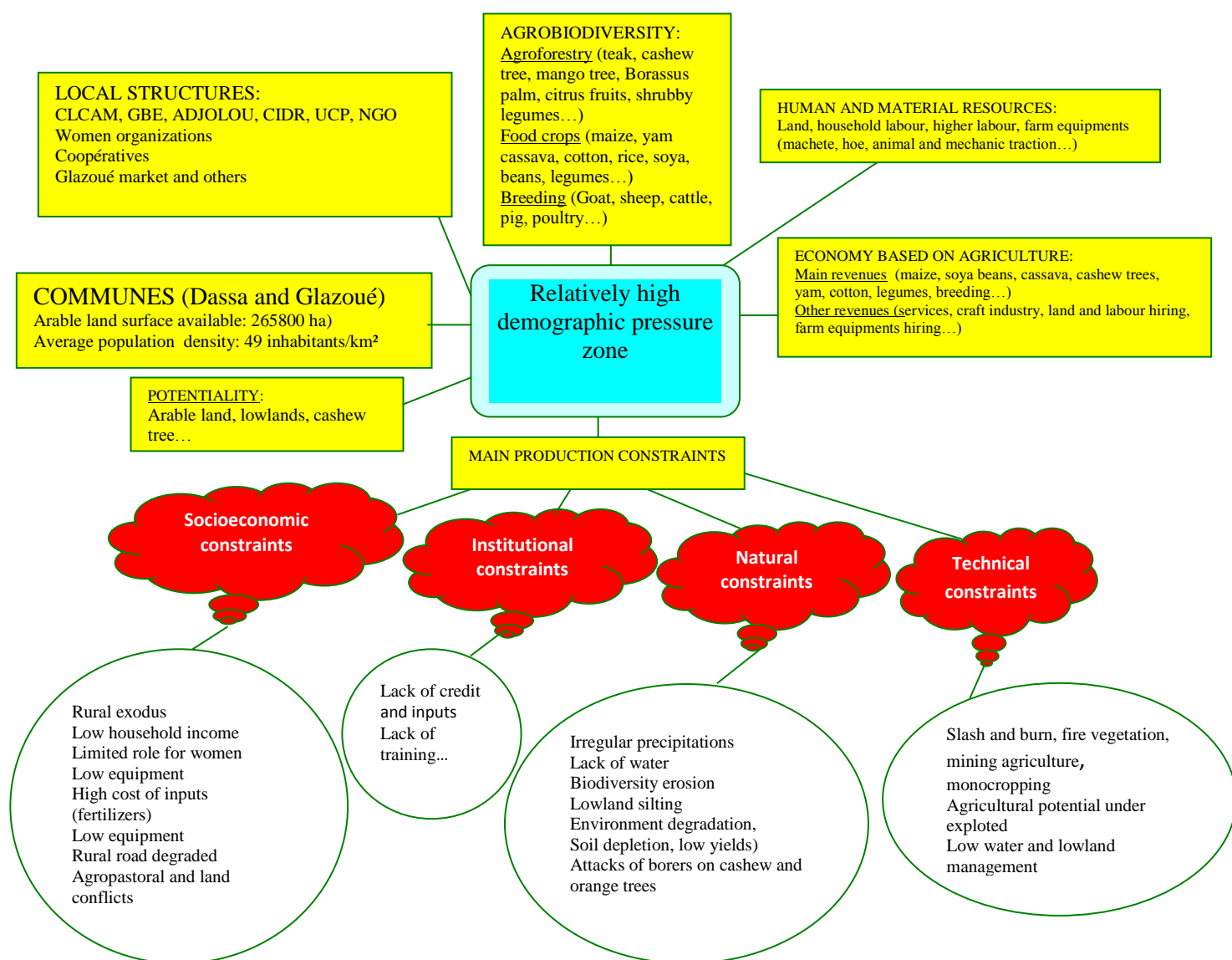


Figure 2: Characteristics of the relatively high demographic pressure zone in the central part of Benin

Low demographic pressure zone in central Benin shows similar characteristics with the arable land surface available (845280 ha) and the population density (25 inhabitants/km²)

This area in central Benin lies between the latitudes 7°45 ' and 8°40' North and longitudes 2°20 ' and 2°35 ' East. The climate is the transitional climatic Guinea-Sudan type with a gradient from bimodal to monomodal rainfall distribution from the south and the north

of Benin respectively. Annual rainfall in the study area varies from 1,100 mm to 1,200 mm with unequal distribution (Zannou, 2006).

Soils are plinthosols and luvisols. The soil physical properties vary according to their clay content (Agossou and Igué, 2002). Vegetation is a degraded woody savannah type. Maize, yam, cassava and groundnut are annual cropping systems and the cash crops are cotton and soyabean.

Yam-based systems with herbaceous legumes

- Intercropped *Aeschynomene histrix* with maize-yam rotation (TMA): smallholders planted maize (spacing 80×40 cm) in April of the first year. *Aeschynomene* seeds (7 kg ha^{-1}) were sown two weeks after the maize (Figure 3).



Figure 3: Fallow of *Aeschynomene histrix* after maize harvesting in Ouessè (Central Benin)

Intercropped *Aeschynomene histrix* with maize for subsequent yam crop (TMA)

- Intercropped *Mucuna pruriens* with maize-yam rotation (TMM): smallholders planted maize. *Mucuna* seeds (25 kg ha^{-1}) were sown at (spacing 80×40 cm) in May six weeks after the maize (Figure 4).



Figure 4: Fallow of *Mucuna pruriens* after maize harvesting in Dassa-Zoumè (Central Benin)

Focus group discussions with smallholders on intercropped *Mucuna pruriens* with maize for subsequent yam crop (TMM)

In both improved yam-based systems (TMA and TMM), some smallholders applied on maize 100 kg ha⁻¹ NPK fertilizer (14% N, 10% P, 11.7% K) in April and 50 kg ha⁻¹ urea (46% N) in June. The maize was harvested in July. Biomass of *Mucuna* and *Aeschynomene* crops were mowed and manually incorporated into the soil in October-December during ridging and then the main yam crop was planted in mounds, without mineral fertilization.

Survey methodology

Household level survey

The individual survey was conducted in 2005 in 306 farm households (120 and 186) in low and relatively high population density in the Guinea-Sudan transition zone of Benin (Table 1)

Table 1: Sample size for household-level survey in the Guinea-Sudan transition zone of Benin

Zone	Village	Household size	sampling Percentage per zone (%)
Low population density zone	Savè	21	61
	Ouessè	76	
	Savalou	39	
	Bantè	50	
Relatively denser population zone	Dassa	61	39
	Glazoué	59	
Total		306	100

Technologies constraints evaluation was determined during individual surveys by the frequency and percentage analysis. The frequency is the number of end-users' response for the constraint within the sampling size.

Focus group discussions at the village level

Various socioprofessional groups took part in different villages in the constraints evaluation in the zone with low and relatively high population density. They were groups of men (30-65 years old) and women (25-55 years old). The maximum size of the groups was an average of 30 per village (Figure 3). Advantages of yam-based technologies with herbaceous legumes were discussed with end-users. The prioritization matrix and the contingent ranking matrix (synthesis matrix at regional level) were used for constraint degree of severity (Deffo *et al.*, 2004). Following parameters were considered in the data analysis:

- Relative importance of a constraint (IR): is the score that the end-users group gave to a constraint. The participants freely established the score notation. The maximum score corresponded to the constraint that the socioprofessional group considered most important or the sum of maximum when the synthesis matrix was concerned. The minimum score was selected equal to zero for the group.
- Constraint degree of severity (DS): is the percentage of the note given to a constraint compared to the maximum score.

Results

Constraints of yam-based systems with herbaceous legumes at the household level

Biomass incorporation difficulty in yam-based technology with *Mucuna* (TMM) was the first constraint reported with 43% and 67% respectively in the relatively high (ZA) and low population density zone (ZB), followed by the problem of competition between *Mucuna* and the pattern crop with 25% (ZA) versus 9% (ZB) (Table 2). Smallholders highlighted the problem of *Mucuna* seeds edibility with 18% and 19% and damages caused by the animal (cattle) divagation (16% and 17%) in ZA and ZB respectively.

Aeschynomene biomass incorporation appeared also as the first constraints in yam-based system with *Aeschynomene histrix* (TMA) with 21% and 84% in both zones (Table 2).

Table 2: Constraints of yam-based technologies with herbaceous legumes (Farm household level)

	Constraints	ZA (N=186)		ZB (N=120)				OI
		Frequency	Percentage (%)	Frequency	Percentage (%)	Frequency	Percentage (%)	
TMM	Biomass incorporation	80/186	43	80/120	67	160/306	52	1
	Competition	47/186	25	11/120	9	58/306	19	2
	Seeds consumption	33/186	18	23/120	19	56/306	18	3
	Animal divagation	30/186	16	20/120	17	50/306	16	4
	Reptile refuge	9/186	5	11/120	9	20/306	7	5
	Fertilizer cost	9/186	5	8/120	7	17/306	6	6
	Plot maintenance	9/186	5	-	-	9/306	3	7
	Vegetation burn	-	-	5/120	4	5/306	2	8
	Seeds marketing	4/186	2	-	-	4/306	1	9
TMA	Biomass incorporation	39/186	21	101/120	84	140/306	46	1
	Grains harvest	39/186	21	38/120	32	77/306	25	2
	Animal divagation	29/186	16	35/120	29	64/306	21	3
	Seeds marketing	30/186	16	-	-	30/306	10	4
	Reptile refuge	-	-	14/120	12	14/306	5	5
	Seeds consumption	9/186	5	5/120	4	14/306	5	5
	Fertilizers cost	9/186	5	3/120	3	12/306	4	6
	Plot maintenance	9/186	5	-	-	9/306	3	7

N= sampling size; TMA: intercropped *Aeschynomene histrix* with maize-yam rotation; TMM:intercropped *Mucuna pruriens* with maize-yam rotation; ZA: relatively high population density zone; ZB: low population density zone; OI: importance order

In addition, farmers revealed the problem of *Aeschynomene* seeds harvest such as the small size of seeds (21% and 32%), the animal divagation (16% and 29%) in the ZA and ZB and the inexistence of the flow market (16%) in ZA.

Constraints of yam- based system with herbaceous legumes at the village level

Focus groups' discussions at the village level and the contingent ranking matrix analysis at the regional level, show as the first constraint the herbaceous biomass incorporation followed by the field access difficulties. In fact, biomass incorporation into the soil and field access difficulties were highly expressed with constraints degree of severity of 82 and 68% for both zones (Table 3).

Table 3: Contingent ranking matrix on constraints in yam-based systems with herbaceous legumes (Focus groups level)

Constraints	ZA				ZB				Prioritisation		
	GW		GM		GW		GM				
	IR	DS	IR	DS	IR	DS	IR	DS	IRT	DS	OI
Biomass incorporation	30	100	20	100	25	83	15	50	90	82	1
Field access	15	50	0	0	30	100	30	100	75	68	2
Grains harvest	20	67	15	75	15	50	15	50	65	59	3
Animal divagation	15	50	18	90	15	50	13	43	61	55	4
Seeds marketing	15	50	20	100	20	67	0	0	55	50	5
Seeds consumption	15	50	10	50	15	50	10	33	50	45	6
Fertilizer cost	29	97	20	100	0	0	0	0	49	45	6
Vegetation burn	0	0	0	0	10	33	25	83	35	32	7
Reptiles refuge	0	0	10	50	10	33	0	0	20	18	8

IR: relative importance of constraint; IRT: Total relative importance of constraint; IRT max = 110 (maximum relative importance of constraint); DS: constraint degree of severity; OI: importance order; GW_: group of women; GM: group of men; ZA: relatively high population density zone; ZB: low population density zone.

Constraints of which in particular the difficulty of harvest, animal divagation, marketing and seeds consumption, fertilizer costs, vegetation burn and the reptile refuge under the biomass were mentioned with constraint degree of severity ranged from 18 to 59%.

Results of the analysis by gender and per zone show that the biomass incorporation for both legumes (100%), the harvest difficulty (67%) and the animal divagation (50%) were the preoccupation of women group in ZA versus the biomass incorporation, seeds marketing, the animal divagation and seeds harvest difficulties with constraints degree of severity ranged (100%; 100%, 90% and 75%) respectively from the men group. Women and men groups in ZA drew particularly attention to high fertilizer costs (97% and 100%) respectively. Both

groups in ZB expressed the field access difficulty (100%). Women and men groups focussed attention on the biomass incorporation (83%) and the vegetation burn (83%) respectively in ZB. Animal divagation was reported with both women (50%) and men (43%) in ZB. Therefore, the gender analysis per zone shows that all these constraints were important with degree of severity (> 40%).

Discussions

End-users' perception about effects of herbaceous legumes in yam-based cropping systems

Herbaceous legumes (*Mucuna* in particular) used for yam production was appreciated by end-users for its capacity to restore the soil fertility, maintain soil humidity and control weeds (*Imperata cylindrica* in particular) as well as in low and relatively high population zones. Furthermore, *Mucuna* increased yield (yam) and supplemented the ruminant's food. This confirmed former works (Tarawali *et al.*, 1993; Versteeg *et al.*, 1998; Carsky *et al.*, 1998; Azontondé *et al.*, 1998; Carsky *et al.*, 1999). Because *Mucuna*, compared with *Aeschynomene* in the study area, grows more rapidly and produces more biomass for subsequent crops. Generally, studies revealed that the incorporation of the biomass gets more nitrogen to the succeeding crop than the mulch application on the soil because the decomposition of organic matter is more rapid after incorporation (Salako and Tian, 2003). Decomposition data indicated that 6 weeks after incorporation of biomass only 30% of *Mucuna* remained (Adjei-Nsiah *et al.*, 2007). This should be related to faster decomposition of *Mucuna* residue biomass and nutrients release for subsequent plants growth. Furthermore, *Mucuna* recycled more macronutrients (N, P, K) than *Aeschynomene* (Maliki *et al.*, 2011). Legumes fallows with *Mucuna*, are known especially for improving the quantity of available P fractions in the soil for subsequent crops (Salako and Tian, 2003). Nevertheless, it depends on the inherent P levels in the soils. *Mucuna* root exudates could solubilize P increasing its availability that is crucial for yam (Maliki *et al.*, 2012). In Benin and Togo, Sodjadan *et al.* (2005) studied the effect on the yam crop of short fallows based on *Mucuna pruriens* var *utilis*, *Aeschynomene histrix*, or *Pueraria phaseoloides*, and reported that a 1-year fallow planted with *Mucuna* led to a significant increase in yam yields.

End-users' perceptions about constraints in yam-based systems with herbaceous legumes

Mucuna and *Aeschynomene* biomass incorporation into the soil was reported in both zones and by both women and men with highest constraint degree of severity. This highlighted the importance of this constraint for yam-based cropping systems with herbaceous legumes.

Seeds consumption constraint was expressed in both zones and confirms former works (Deffo *et al.*, 2002). In fact, the seeds of *Mucuna* contains 3-(3,4-dihydroxyphenyl)-L-alanine, known as L-Dopa which makes difficult *Mucuna* grains consumption. Human consumption of unprocessed beans can cause intoxication, but the toxins can be removed by boiling and soaking the seeds in several changes of water (Kay, 1979). The L-Dopa content of *Mucuna* ranges from 4.7 to 6.4% (Versteeg and Koudokpon, 1990). The end-users would undoubtedly grant more credit to yam-based technologies with *Mucuna*, if in addition to its fertilizing role, the seeds were edible. In spite of the research undertaken by several organisations on this issue, *Mucuna* grain consumption remained difficult. This constraint raises the problem of the *Mucuna* seeds valorisation.

End-users would undoubtedly adopt yam-based technologies with herbaceous legumes if there was a market for the flow of seeds. The farmers assured about the marketing of their products would increase adoption. The existence of a market contributes to the adoption of improved technologies for high yields and farm household incomes (Boserup, 1970; Braun and Kennedy, 1986).

Animal divagation was reported by both women and men in both zones (ZA and ZB). In fact, livestock has long been an integral part of West African farming systems. The communal and extensive grazing of natural pastures continues to be the predominant feeding strategy in the Guinea-Sudan transition zone of Benin (Figure 5).



Figure 5: Animal divagation contributing to crops damage and herbaceous biomass remove (Ouessè in central Benin)

This practice leads to the lack of high quality fodder especially during the dry season and the use of crop residues in the fields for livestock's feeding. The ruminant (cattle) grazing through the landscape lead to biomass removal, plants and crop residues damage (Dugué *et al.*, 1998). There is an urgent need to replace this destructive cycle with economically and ecologically viable farming systems.

Mineral fertilizer application appeared to be essential particularly in ZA, but the high cost of inputs limits their application. Smallholders use fertilizers on maize on depleted soils depending on cash and inputs availability. Consumers' requirements for the quality and taste often slowed down the direct application of chemical fertilizers on yam because of their "presumed negative effect" on the quality of pounded yam (Vernier and Dossou, 2003). For this reason, farmers avoid applying mineral fertilizers during the yam production cycle. Nevertheless, in yam-based cropping systems with herbaceous legumes, the mineral fertilizer is applied on the preceding crop (maize) and yam could profit from the residual effect. In fact, there is often a problem of NPK equilibrium for tuber production: too much nitrogen and not enough K, resulting in tubers with too high water content, with consequences on tuber conservation and on fufu preparation. Further information is needed to farmers in this way for sustainable yam production.

Conclusion

The paper highlights on farm research with yam-based cropping systems. Participatory diagnosis evaluates the severity of constraints in yam-based systems with herbaceous legumes. As a whole, the herbaceous legumes solved the problem of soil fertility. *Mucuna* in particular was appreciated for its capacity to restore the soil fertility, to maintain soil humidity and to control weeds as well in low as in relatively high population density zones. Herbaceous legumes increased crop yield (yam) and supplemented the animal feeding according to farmers' opinions. Results show significantly high constraint degree of severity for herbaceous legumes biomass incorporation with *Mucuna* (52%) and *Aeschynomene* (46%) during household-level surveys and 82% for both legumes during focus group discussions. Crop competitions, field access (with *Mucuna*), animal divagation, fertilizers cost, legumes burning, seed consumption, market for the legumes, seeds harvested in particular in the case of *Aeschynomene* were additional constraints in both low and relatively high population density zone.

We thus suggest both mulching and biomass incorporation into the soil. Three-quarters of biomass could be manually incorporated into the soil in October-November during ridging, and the remaining biomass could be left on the surface as mulch in order to reduce workloads related to the incorporation (Figure 6).



Figure 6: Three-quarters of *Aeschynomene histrix* biomass manually incorporated into the soil in October-November during ridging, and the remaining quarter left on the surface as

mulch in order to reduce the workload related to the biomass incorporation in the soil (Central Benin)

The practice of fire wall and fire of reference around the plot is necessary to avoid the burning of the mulch in dry periods (Figure 7).



Figure 7: Late burn of *Aeschynomene histrix* biomass in dry period in Ouessè (Central Benin)

The mulch will contribute to protect seed yam from solar radiations, to improve soil humidity and earthworms' activity. Nevertheless, the seed production plot is needed in order to induce plant material availability. On the seed production plot, the biomass of *Aeschynomene* at senescence is shaken within basins to collect the seeds (Figure 8).



Figure 8: Seed production plot: *Aeschynomene histrix* seeds harvesting in Dassa-Zoumè (Central Benin)

On the seed production plot, the biomass of *Aeschynomene* at senescence is shaken within basins to collect easily the seeds.

Mucuna seeds valorisation would generate additional incomes for smallholders' households. Animal feeding with *Mucuna* seeds deserves to be further investigated.

The crop-livestock integration with these herbaceous legumes should be an opportunity for yam production in dynamic of rotations, because of agropastoral potential in the Guinea-Sudan transition zone of Benin. Integration of forage legumes into the traditional fallow management can help improving both forage supply at a time of feed scarcity and soil fertility. Corraling contracts in the fence-based cropping systems with forage legumes are important form of crop-livestock interaction during the dry season and could contribute to manures supply and nutrient cycling for the benefit of crops and soil. This practice returns both manure and urine to soil and can conserve nutrients.

A detailed attention deserves to be given to the technical, institutional and political problems facing end-users and more information, as well as advices are required in order to improve the level of adoption of yam-based technologies with herbaceous legumes.

The part 3 discusses on the agronomic and economic performances of the smallholder-adapted alternative yam-based cropping systems with herbaceous and/or shrubby legumes and implications of our findings for international application.

**Systèmes adaptés par les petits producteurs
(essais conduits de 2007 à 2010):
Agronomic and economic performances of yam-based
systems with shrubby and herbaceous legumes adapted by
smallholders**

R. Maliki, D. Cornet, A. Floquet, B. Sinsin

Outlook on AGRICULTURE Vol 41, No 3, 2012, pp 171–178 doi: 10.5367/oa.2012.0094

Partie 3

Agronomic and economic performances of yam-based systems with shrubby and herbaceous legumes adapted by smallholders

Abstract

West Africa is now confronted with a land scarcity and slash-and-burn shifting cultivation systems come to their limits. With the aim of designing more sustainable yam cropping systems, the agronomic research organization in Benin implemented trials in partnership with smallholders on alternative yam-based systems with shrubby (*Gliricidia sepium*) and or herbaceous (*Aeschynomene histrix*) legumes. In a first phase, farmers have been adjusting these alternative systems to their own constraints and these adjusted systems have been put under test in a second round. The agronomic and economic performances of these farmer-adapted alternative yam-based cropping systems and implications of our findings for international application are discussed in this paper.

Keywords: Adaptive research; Yam-based systems; *Aeschynomene histrix*; *Gliricidia sepium*; Net present value; Modeling

Introduction

West Africa currently produces more than 40 million t year⁻¹ yam, that is 90% of worldwide production (FAOSTAT, 2010). The production increase was obtained on larger yam-cultivated areas in slash-and-burn and shifting cultivation systems (Figure 1) (Torquebiau, 2007), indicating that only a limited degree of intensification was under way.



Figure 1: Slash-and-burn and shifting cultivation yam-based system in Guinea-Sudan transition zone (Central Benin)

Benin is the world's fourth ranking producer, after Nigeria, Côte d'Ivoire, and Ghana. Nowadays, farmers hardly have the possibility to rely on long duration fallow and yam is being cultivated in 1 or 2-year herbaceous fallow–yam or maize/sorghum–yam rotation systems with manual incorporation of residue into the soil (Doumbia, 2005).

With the aim of designing more sustainable yam cropping systems, national research organization in Benin implemented trials in partnership with smallholders on alternative yam-based cropping systems with shrubby (*Gliricidia sepium*) and or herbaceous (*Aeschynomene hirta*) legumes. The most important constraints for agroforestry systems adoption, notably alley cropping (Kang and Reynolds, 1986), are its pruning workload as well as competition

between shrubs and crops for nutrients and light (Figure 2) (Floquet, 2006; Maliki *et al.*, 2006).



Figure 2: Alley cropping systems with *Gliricidia sepium* for yam production in Guinea-Sudan transition zone (Central Benin)

It is well-known today that smallholders deeply readjust technologies developed in close relationship with researchers when confronted with various constraints (land, soil quality, labor, cash, etc). The originality of the experiments presented here is that a first range of adaptations by smallholders of the technologies initially suggested by researchers has been integrated in the experimental design. In the agroforestry-yam based system at the end of the rotation, the plot remains under fallow during a few years before being cleared for yam and *Gliricidia sepium* (*Gliricidia*) usually grows to medium-sized shrubs.

Instead of pruning these shrubs at land clearing time, most of the smallholders use early fire of *Gliricidia* fallow in order to reduce the labor demand and improve light and nutrients access to subsequent crops (yam), a practice that fits in traditional slash-and-burn wooded fallow and yam systems. This adapted design was included into 4 years experimentation. The objective of this study is to evaluate the agronomic and economic performances of this adapted alternative yam-based cropping system and draw out the implications of our findings for international application.

Materials and Methods

Study sites

The study was carried out in Central Benin, in the Guinea-Sudan transition zone (7°45'-8°40' N, 2°20'- 2°35' E) in 8 sites (Adjanoudoho, Akpéro, Boubou, Dani, Gbanlin, Gomè, Magoumi and Miniffi). The climate is tropical with a bimodal rainfall pattern. The soils are plinthosols (Gbanlin and Akpéro), and luvisols (Adjanoudoho, Miniffi, Gomè, Magoumi, Dani). Gomè and Magoumi are particularly located in lowlands and the other sites on plateaus. Vegetation is a degraded woody savannah type. Villages were selected to represent the land and ethnic variability in the zone (soil preparation practices, pool of yam varieties, rotations, etc) according to smallholders' origin and to the cropping intensity.

Experimental design

The experimental designs adapted by smallholders integrating yam-based systems with legumes (maize+*Aeschynomene*+*Gliricidia*-yam rotation with early fire of shrubs, maize+*Aeschynomene*-yam rotation and maize+*Aeschynomene*+sorghum-yam rotation) in comparison with their traditional yam-based systems respectively (long shrubby fallow-yam rotation with slash-and-burn, maize+*Aeschynomene*-yam rotation and maize+*Aeschynomene*+sorghum-yam rotation) (Table 1).

Table 1. Trial designs over the four years (2007-2010)

Designs	Year 1 (2007)	Year 2 (2008)	Year 3 (2009)	Year 4 (2010)
Design 1	T0	Yam	T0	Yam
	TMAGB		TMAGB	
Design 2	T1	Yam	T1	Yam
	TMA		TMA	
Design 3	T2	Yam	T2	Yam
	TMAS	Yam	TMAS	Yam

In the low population density zone, these were slash-and-burn perennial fallows (8 years); in denser population density, 1-year grass fallows of *Andropogon*, or even continuous cropping maize-sorghum. *Gliricidia sepium* was planted in 2000 (7 years of establishment) and trials were monitored in the 2007-2008 and 2009-2010 cropping seasons with 9 farmers

(design 1), 24 farmers (design 2) and 6 farmers (design 3) integrating three types of varieties: early maturing *Dioscorea rotundata* (V₁), late maturing *Dioscorea alata* (V₂) and late maturing *Dioscorea rotundata* (V₃).

For each of adapted yam-based cropping systems, we used a randomized block design with 4 replicates. Plot size was 5 m × 5 m for each variety (total design per farm: 600 m²). Smallholders conducted the three designs in a perennial experiment for 4 years, with 2-years rotations.

Design 1:

-T0 (Control), rotation of perennial fallow-yam (Figure 3).



Figure 3: Long perennial shrubby fallow-yam rotation with slash-and-burn (T0) in Guinea-Sudan transition zone (Central Benin)

The trees of the perennial natural fallow incinerated in this traditional system, died, and replaced after by the *Andropogon gayanus* grass.

-TMAGB, (rotation maize/Aeschynomene/Gliricidia - yam) (Figure 4): *Gliricidia* fallow had been planted in July 2000 at a spacing of 4 m × 4 m with density of 629 shrubs ha⁻¹. On this plot, after an early fire of *Gliricidia sepium* shrubs in order for farmers to avoid the pruning workload, maize (*Zea mays* L.) was sown at a spacing of 80 cm × 40 cm in April (first year

2007). *Aeschynomene* seeds (7 kg ha^{-1}) were mixed with dry sand and planted in April, (first year 2007), approximately 2 weeks after the maize crop.



Figure 4: Smallholders' adapted agroforestry system as maize+*Aeschynomene histrix* +*Gliricidia sepium*-yam rotation with early fire of shrubs (TMAGB) in Guinea-Sudan transition zone (Central Benin)

The *Gliricidia* coppice regenerates after shrubs incineration.

Design 2 :

- T1 (control), 1-year fallow – yam rotation: natural fallow of *Andropogon* grass was naturally established (first year).
- TMA (rotation *Aeschynomene*/maize– yam rotation): Similar to TMAGB but without *Gliricidia*.

Design 3 :

- T2 (control), a 1 year maize/sorghum– yam rotation (Figure 5): Sorghum was planted in June after maize. After sorghum harvesting in December (first year 2007), smallholders used their stems for yam vines staking (following year).

-TMA (rotation *Aeschynomene*/maize/sorghum-yam): Similar to TMA but with sorghum planting in June after maize and *Aeschynomene*.



Figure 5: Smallholders' adapted herbaceous legume system as maize+*Aeschynomene histrix*+sorghum-yam rotation (T2) in Guinea-Sudan transition zone (Central Benin): use of sorghum stems for yam vines staking

Data collection

Soil samples

Composite soil samples were collected in each field before the beginning of the experiment along plot transects at soil depths of 0-15 cm and 15-30 cm (30 farm fields \times 2 depths = 60 samples) in order to determine soil characteristics.

Areal biomass

The areal biomass of maize, sorghum, *Andropogon* and *Aeschynomene* was evaluated in each design. The biomass was collected separately in October 2007 and 2009 respectively in four 1-m² quadrats within each plot. The biomass of *Gliricidia* (leaves and branches) and

natural perennial fallow (with *Daniellia oliveri* dominance) were estimated by pruning (January 2007 and 2009) in two representatives 25-m² quadrats within each plot. Grass herbaceous (*Andropogon*) biomass from the inferior stratum of natural perennial fallow was weighted in four 1-m² quadrats within each plot. Biomass samples collected from different sources of organic matter were dried at 60 °C until constant weight and dry weight was then determined. In July and December, maize and sorghum grains were respectively harvested per row on each plot and DM determined. The fresh yam tuber weight was estimated on each plot in December 2008 and 2010.

The biomass dry matter (DM) of trees is as follows:

$$B_c = \frac{10^{-3} * E_s * D_c * B_f}{E_f * N_c} \quad (1)$$

B_c = Biomass dry matter (DM) of trees (t ha⁻¹)

E_s = Biomass DM sample (g)

E_f = Biomass fresh matter (FM) sample (g)

B_f = Biomass FM in two 25 m² quadrats (kg)

D_c = Trees density (ha⁻¹)

N_c = Trees density in two 25 m² quadrats

The biomass dry matter (DM) of herbaceous residue is as follows:

$$B_h = \frac{10^{-3} * S * P_s * B_{fh}}{S_0 * P_f} \quad (2)$$

B_h = biomass dry matter (DM) of herbaceous residue (t ha⁻¹)

B_{fh} = biomass FM of herbaceous residue in four 1m² quadrats (kg)

P_s = biomass DM sample (g)

P_f = biomass fresh matter (FM) sample (g)

S_0 = four 1m² quadrats

S = 10000 m²

Soil analysis

Soil characteristics were analyzed: physical properties (standard method), pH (Kcl) (using a glass electrode in 1:2.5 v/v soil solution), total N (Kjeldahl digestion in a mixture of H₂SO₄-Selenium followed by distillation and titration), available P (Olsen method), and organic carbon (Walkley and Black method), exchangeable cations (with 1 N ammonium acetate at

pH 7, then, K was determined by flame photometer, and Ca and Mg by Atomic Absorption Spectrophotometry).

Statistical analysis

Analysis of variance (ANOVA) was applied to the yam yields using a randomized block design and a partial nested model with six factors: Year, Replicate, Farmer, Site, Variety and Treatment. The logarithmic transformation was applied to yield values in order to normalize the data and stabilize the variance of populations. The random factors were “Year”, “Site”, “Replicate” and “Farmer” considered as nested within “Site”. The fixed factors were “Variety” and Treatment”. The General Linear Model (GLM) procedure (SAS, 1996) was computed to assess the interactions between the factors involved. When interactions between main factors were significant, interaction diagrams were established to describe the effect of each factor. Least square means and standard error were also computed for factor levels and the Newman and Keuls test was applied for difference between treatments. Significance was regarded at $p \leq 0.05$.

Economic analysis

A simple financial analysis was performed to evaluate the profitability of each yam-based cropping system. We considered the time horizon 2007-2010 (4 years) without *Gliricidia* establishment period. We considered *Gliricidia* establishment costs and a discount rate of 10%, World Bank standard, not too far from bank interest rates. The choice of discount rate is always an object of controversy among economists (Stern, 2006). We considered discount rates ranging from 0% to 50% for sensitivity analysis.

The net present value is as follows:

$NPV = (TPR - TPC)$ or

$$NPV = \sum_{i=1}^n \frac{R_n}{(1+r)^n} - \sum_{i=1}^n \frac{D_n}{(1+r)^n} = \sum_{i=1}^n \frac{(R_n - D_n)}{(1+r)^n} \quad (3)$$

NPV = Net Present Value (US\$)

TPR = Total Present Revenue (US\$)

TPC = Total Present Cost (US\$)

R_n = Revenue in the year n (US\$)

D_n = Cost in the year n (US\$)

r = Discount rate (%)

Returns on investment (RI %) were also computed through the formula:

$RI = 100 \times (NPV/TPC)$, if $RI >$ interest rate on capital, this implied profitability (4).

Labour productivity US\$ per man-day (LP) was given by: $LP = NPV/L$, where L (man day) is the total labour requirement (5).

Economic yields for sorghum, maize were based on 15% moisture content while that of yam was based on fresh weight. Costs of production were divided into land (hired land cost US\$ ha⁻¹ year⁻¹), inputs (maize, yam and legume seeds, fertilizers costs) and labour (farm activities costs for yam-based cropping systems establishment and management). Land, inputs and labour costs were determined based on local prices. We considered the average annual prices for food crops (maize, sorghum and yam) based on the prevailing market price (Glazoué market in the central Benin). All amounts of money were expressed in US dollars (501.8 FCFA to US\$ 1, 1 December 2010).

Results

Initial soil characteristics

The initial soil fertility status of different sites was poor (Table 2). Soil organic matter (SOM) contents were low in all fields, ranging from 0.58 to 1.47% at 0-30 cm depth, and the C:N ratio ranged from 11.88 to 16.45. Available P levels (mg/kg) were very low and varied from 2 to 6.3. The soils were slightly acid. N, P and SOM contents were higher in 0-15 cm than in 15-30 cm depth, except at Dani and Gbanlin sites for C (%), N (‰), P (mg/kg) and organic matter (%) were lower at Gomè (hydromorphic lowland soils) and Miniffi than other sites (Dani, Boubou, Gbanlin and Akpéro). Gbanlin showed highest CEC (me/100g) and Gomè the lowest. Globally, CEC was low and the adsorbent complex was saturated in Ca and Mg. Adjanoudoho and Magoumi are near Miniffi and Gomè respectively. Soil characteristics of these soils were not determined.

Table 2: Average initial soil characteristics at the sites (Miniffi, Gomè, Dani, Boubou, Gbanlin, Akpéro), 0-15 cm and 15-30 cm soil layers (in 2007, 30 farms, Benin)

Villages	Clay	Silt (thin)	Silt (rough)	Sand (thin)	Sand (rough)	pH KCl	OM	C	Total N	C:N	P Olsen	Exch. Ca	Exch. Mg	Exch. K	Exch. Na	Exch. Al	Exch. Mn	Exch. H	CEC
Depth (cm)	%	%	%	%	%		%	%	‰		mg/kg	me/100g	me/100g	me/100g	me/100g	me/100g	me/100g	me/100g	me/100g
Miniffi																			
0-15	5.46	3.07	4.65	27.75	59.07	5.91	0.89	0.52	0.32	15.92	2.68	2.04	0.53	0.15	0.04	0.01	0.07	0.01	2.75
15-30	10.81	2.98	4.58	26.94	54.69	5.39	0.72	0.42	0.30	14.34	2.16	2.97	0.82	0.12	0.15	0.03	0.08	0.01	4.16
Gomè																			
0-15	5.6	5.88	9.53	42.83	36.16	4.56	0.69	0.40	0.25	16.45	2.10	1.45	0.48	0.08	0.06	0.04	0.09	0.02	2.10
15-30	5.66	5.69	9.06	43.39	36.22	4.46	0.58	0.34	0.21	16.34	1.53	1.28	0.48	0.06	0.05	0.05	0.06	0.02	1.86
Dani																			
0-15	6.96	3.97	4.02	28.71	56.34	5.49	1.18	0.69	0.55	12.63	2.30	2.20	0.88	0.27	0.05	0.03	0.09	0.02	3.30
15-30	6.07	4.33	3.28	25.15	61.17	5.60	1.05	0.61	0.56	11.64	2.45	2.30	0.97	0.24	0.05	0.03	0.07	0.02	3.35
Boubou																			
0-15	5.62	3.51	3.81	27.88	59.19	5.69	1.47	0.85	0.64	13.73	5.23	3.47	1.12	0.17	0.06	0.01	0.06	0.01	4.89
15-30	4.93	3.07	3.36	24.27	64.37	5.38	0.83	0.48	0.43	12.18	3.54	2.08	0.85	0.13	0.07	0.01	0.06	0.01	3.02
Gbanlin																			
0-15	4.59	2.52	2.74	21.38	68.76	6.15	1.46	0.84	0.69	12.58	6.20	3.90	0.87	0.15	0.05	0.01	0.04	0.01	4.85
15-30	4.84	3.03	2.72	20.59	68.82	5.98	1.40	0.81	0.62	13.98	6.30	3.85	0.98	0.20	0.05	0.01	0.05	0.01	5.06
Akpéro																			
0-15	4.00	3.86	3.50	13.25	75.4	6.17	1.27	0.74	0.53	14.01	3.40	2.42	0.61	0.10	0.08	0.01	0.06	0.01	2.95
15-30	4.32	5.20	3.82	16.41	70.25	5.94	0.92	0.53	0.50	11.88	2.00	2.06	0.53	0.10	0.06	0.01	0.11	0.01	2.57

C: soil carbon concentration (%); Total N (%): Total soil nitrogen concentration; OM (%) (= $1.72 \times C\%$): soil organic matter content; C:N: Index of biodegradability or ratio of soil carbon to nitrogen; P. ass. Olsen (mg/kg): soil phosphorus; Exch. Ca (me/100g): exchangeable Ca^{2+} ; Exch. Mg (me/100g): exchangeable Mg^{2+} ; Exch. K (me/100g): exchangeable K^{+} ; Exch. Na (me/100g): exchangeable Na^{+} ; Exch. Al (me/100g): exchangeable Al^{3+} ; Exch. Mn (me/100g): exchangeable Mn^{+} ; Exch. H (me/100g): exchangeable H^{+} ; CEC (me/100g): exchangeable Cation;

Biomass and yam yields

Before yam planting, improved fallows (TMA, TMA5 and TMAGB) showed significantly higher biomass ($P < 0.01$) than controls (T0, T1 and T2) during both 2007 and 2009 cropping seasons (Table 3).

Table 3: Fertilizing biomass in three smallholders' traditional rotations compared to the three improved fallow designs during the 2007 and 2009 cropping seasons.

Design	Treatment	Biomass (t ha ⁻¹)	
		2007	2009
Design 1	T0	16.8 b	2.81 b
	TMAGB	18.4 a	9.28 a
	LSD 5%	1.05	0.75
	SD	2.2	1.58
Design 2:	T1	4.3 b	3.91 b
	TMA	9.14 a	8.29 a
	LSD 5%	0.3	0.27
	SD	1.04	0.95
Design 3:	T2	6.53 b	5.35 b
	TMA5	11.13 a	9.74 a
	LSD 5%	0.55	0.46
	SD	0.92	0.76

Means with the same letter within column are not significantly different ($p < 0.05$)

The average areal biomass of *Aeschynomene* from different designs was 6 t ha⁻¹ year⁻¹ whereas *Gliricidia* showed an amount of 4.2 t ha⁻¹ year⁻¹ DM with the drastic decrease of biomass (leaves and branches) the subsequent year because of the early fire effect. Maize and sorghum biomass contribution were respectively 2.75 t and 2.5 t ha⁻¹ year⁻¹ DM (results not presented).

Yam-based cropping systems with herbaceous and or shrubby legumes showed significantly higher yam yields than traditional systems. The planted fallow integrating *Gliricidia sepium* can replace traditional slash-and-burn systems of long natural fallow: it induced a significant increase in yields, even with an early maturing most demanding in fertile soil *Dioscorea rotundata* variety (Table 4).

Yam yields were significantly higher in 2008 than in 2010 cropping seasons in all sites (Table 4).

Table 4: Effect of improved fallows compared to their respective controls according to yam variety (early maturing *Dioscorea rotundata*, late maturing *Dioscorea alata*, late maturing *Dioscorea rotundata*) in 2008 and 2010 cropping seasons

Treatment	Variety	Design 1		Design 2				Design 3			
		Yam Yield (t ha ⁻¹)		Yam Yield (t ha ⁻¹)				Yam Yield (t ha ⁻¹)			
		2008	2010	2008		2010		2008		2010	
T0	V1	23.48c	20.04c	T1	V1	15.58c	13.11c	T2	V1	16.57c	14.9c
	V2	22.54cd	19.92c		V2	13.75d	11.97d		V2	15.88c	14.8c
	V3	17.42e	15.06e		V3	10.85e	9.47e		V3	12.82d	11.22d
TMAGB	V1	32.18a	23.91a	TMA	V1	21.53a	17.62a	TMAS	V1	21.62a	20.02a
	V2	28.97b	22.98b		V2	17.95b	15b		V2	19.95b	18.4b
	V3	21.54d	17.67d		V3	13.58d	11.76d		V3	15.4c	14.11c
LSD 5%		2.04	1.24			1.3	0.97			1.57	1.44
SD		2.98	1.81			3.1	2.32			1.87	1.72

Means with the same letter within column are not significantly different ($p < 0.05$)

The ANOVA, partial nested model allows for analyzing simultaneously these factors (Table 5). The ANOVA confirms that yam yields are significantly different only for D2 ($P < 0.01$), but these differences become significant for all designs if the interaction between treatment and variety is taken into account. The heterogeneity of results should be related to the smallholders' individual effects and their practices (farmers' effect).

Table 5: ANOVA in a partial nested model of main factors effects of a 2007-2008 and 2009-2010 trial on logarithmically transformed values of yam yields in three yam-based systems (Benin)

Factors Source	Design 1			Design 2			Design 3		
	DF	F	P	DF	F	P	DF	F	P
Farmer (Site)	6	22.02	0.001	16	13.81	0.000	4	14.26	0.012
Year	1	6.52	0.085	1	22.03	0.001	1	7.28	0.233
Replicate	3	2067.53	0.000	3	1708.7	0.000	3	694.34	0.000
Site	2	1.68	0.233	7	1.8	0.128	1	2.49	0.172
Treatment	1	14.68	0.083	1	187.56	0.001	1	1724.88	0.732
Variety	2	13.57	0.011	2	16.28	0.000	2	14.35	0.067
Site×Treatment	2	2.78	0.174	7	3.58	0.058	1	0.17	0.736
Treatment×Farmer(Site)	6	4.53	0.000	16	1.2	0.261	4	1.48	0.207
Year×Treatment	1	9.02	0.095	1	2.88	0.133	1	1.09	0.486
Year×Site	2	13.69	0.068	7	14.8	0.001	1	13.13	0.171
Treatment×Variety	2	9.28	0.000	2	11.01	0.000	2	4.16	0.017
Site×Variety	4	76.27	0.000	14	69.42	0.000	2	23.39	0.000
Year×Variety	2	8.12	0.000	2	5.23	0.006	2	0.79	0.454
Year×Site×Treatment	2	6.75	0.001	7	1.41	0.199	1	0.9	0.345
Error	395			1065			261		
Adjusted R ² (%)	96.76			91.56			92.68		

Legend: DF: Degree of freedom; F: Fisher test; P: Probability

Profitability of different yam-based cropping systems

Net Present Values (NPV) and Returns on Investment are higher in yam-based cropping systems with shrubby and or herbaceous legumes (TMAGB; TMA and TMA) than in controls (T0, T1 and T2), as shown in Table 6. However, the yam-based agroforestry system with *Gliricidia* requires much more labour and shows a lower labour productivity than the perennial natural fallow.

Table 6: Estimated annual present costs of production, net present value, returns on investment, labour requirement and labour productivity of three different yam-based cropping systems: time horizon (4 years), discount rate (10%), 2007-2008 and 2009-2010 cropping seasons, Benin

	Design 1		Design 2		Design 3	
	T0	TMAGB	T1	TMA	T2	TMAS
Total Present Revenue (US\$ ha ⁻¹)	2373	3324	1235	2108	1661	2272
Production Cost (US\$ ha ⁻¹)						
Land	10	10	10	10	10	10
Input	697	704	697	704	702	705
Labour	171	407	219	357	334	456
Total Present Cost (US\$ ha ⁻¹)	724	911	988	872	852	948
Net Present Value (US\$ ha ⁻¹)	1956	2709	1046	1723	1358	1874
Return on Investment (%)	54	59	21	39	32	39
Labour requirement (man day ha ⁻¹ year ⁻¹)	51	111	63	100	98	131
Labour Productivity (US\$ ha ⁻¹ year ⁻¹)	38.3	24.4	16.6	17.2	13.9	14.3

Figure 6 depicts the NPVs of the various yam-based systems with a time horizon of 4 years (2007-2009) according to various discount rates (0% - 50%). The discount rates reflect the alternative of the investment opportunities and the diverse farmers' preference for investments rather than an immediate income. Yam-based systems with *Aeschynomene* bring NPVs per surface unit higher than all the local systems including the perennial natural fallow (T0) during the first four years. However, the systems with *Aeschynomene* without agroforestry (TMA) exceed the systems with degraded fallow of *Andropogon* (T1) and continuous cropping (T2).

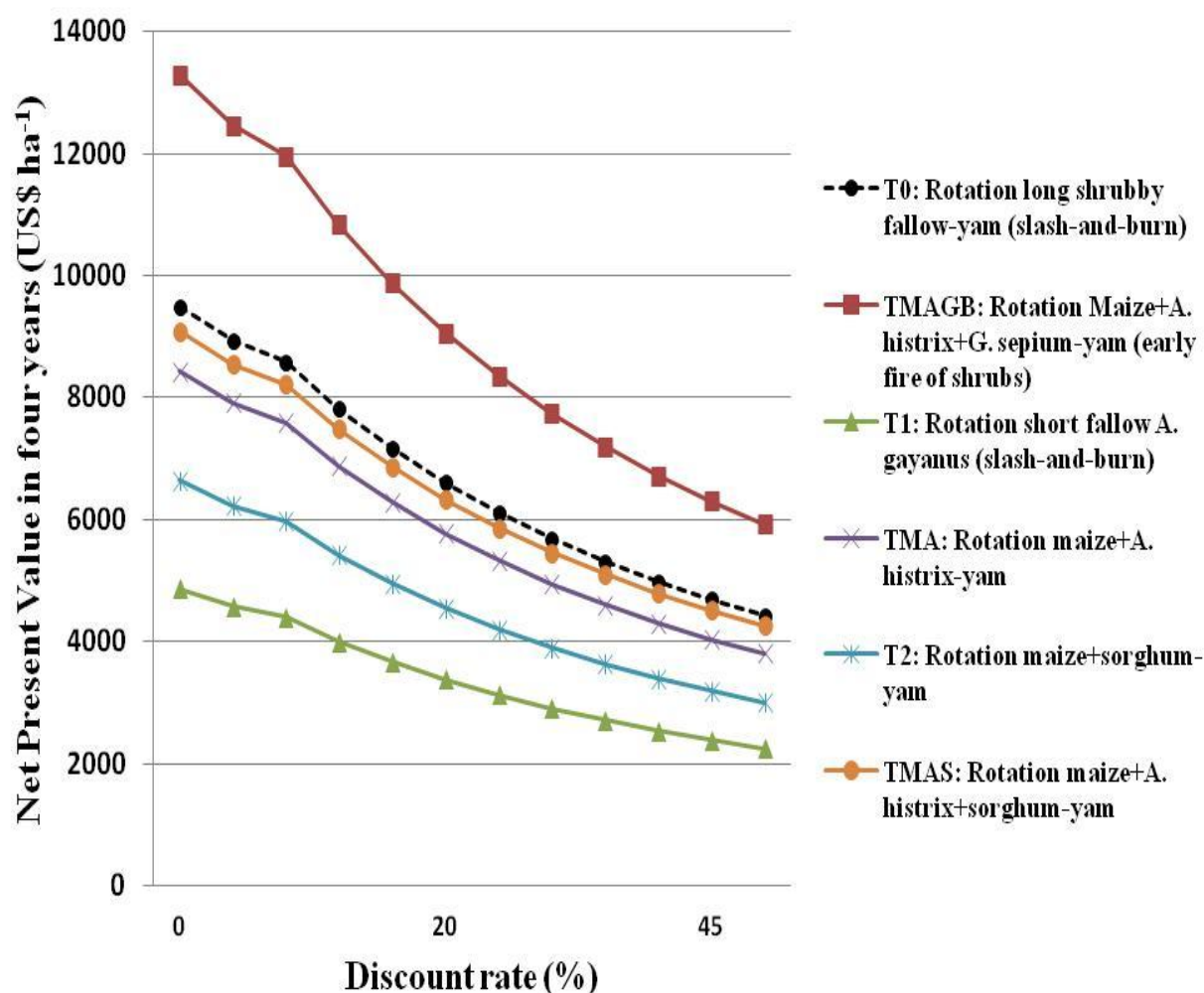


Figure 6. Profitability of yam-based cropping systems integrating shrubby and herbaceous legumes in comparison with traditional yam-based systems (time horizon: 4 years, 2007-2010 cropping seasons)

Discussion

Initial soil fertility status of the sites

The initial soil fertility status of the sites is low. Indeed, soil samples collected before the legumes establishment according to the depths (0-15 and 15-30 cm) show low levels of soil organic matter concentration in all fields (0.58 to 1.47%), of available P (1.53 to 6.3 ppm), of N (0.21 to 0.61 ‰) and K⁺ (0.06 to 0.27 meq / 100 g soil). The CEC of soils is low.

The CEC ranges from 1.86 to 5.06 meq / 100 g of soil and the absorbent complex is globally saturated in Ca and Mg. The low rate of organic matter of these soils could be explained by mining agriculture with low organic matter and nutrients restoration. Nitrogen is the most deficient component of these soils grown with low organic matter content. Yekini (1991) reported that total nitrogen deficiency of these soils lies in the fact that nitrogen is the only major nutrient that does not exist in the bedrock. Further, the transfer of atmospheric nitrogen to the soil by biological and chemical process is slow. Losses of nitrogen in these soils are common because of the highly volatile and soluble of this nutrient. Levels of soil macronutrients (N, P and K) and soil organic matter (SOM) are higher on the sites of Boubou, Gbanlin and Akpéro near the forest. The site of Gomè, in particular, shows lower concentrations in these nutrients. This site located in lowland shows a relatively low CEC correlated with the low rate of SOM and exchangeable cations (K^+ , Ca^{2+} , and Mg^{2+}). Therefore, nutrients are weakly held by clay-humic complex (CHC). They are rapidly leached as a result of the precipitation. The relatively high Al^{3+} concentration level observed on the site of Gomè explains the tendency to the acidification (pH (KCl): average of 4.5).

Agronomic performances of yam-based cropping systems

Yam yields were significantly higher in 2008 than in 2010 cropping seasons in all sites. This could be related to the rainfall regime and or to decreasing soil fertility. Rainfall variability affected yam production. The delayed rainy season, hydric stress or the water excess can be prejudicial to crop growth and yam production (Degras, 1986). Yam is demanding in water especially after crop germination and then between the fourteenth and twentieth weeks of vegetation (Dansie *et al.*, 2003). The highest yam yield in 2008 cropping season could be justified by the favorable weather conditions in this year compared to the 2010 cropping season characterized by an abundance of rains and floods in the southern part of the study area. Carsky *et al.* (2001), reported a yield of approximately 10 t ha^{-1} for yam cultivated after forest or long fallow under slash-and-burn, followed by decreasing yields in subsequent years. In the savannah zone of Nigeria, Watson and Goldsworthy (1964) estimated a yam yield of 11 t ha^{-1} after a 3 or 4-year fallow and less than 6 t ha^{-1} after 1 or 2-year fallow. The sites with the highest productivity are those where the last forests are still being cleared while those with low productivity have been cultivated for more than one generation. With regard to the yam varieties, the early maturing *D. rotundata* variety obtained the highest yam yield on all the sites but this effect was significantly higher on the sites with a high yam

production potential (yam yield $> 15 \text{ t ha}^{-1}$). On sites with a low productivity (yam yield $< 15 \text{ t ha}^{-1}$) the late maturing *D. alata* performed best.

Yam yields are significantly influenced by interactions treatment \times variety, site \times variety and year \times variety (designs 1 and 2). The effects of yam-based cropping systems with herbaceous legumes on yam yields are significantly higher than in the degraded natural fallow of the local yam-based cropping systems (T0 and T1). In the later, frequent bush fires reduce the biomass restitution from degraded *Andropogon* grass fallows, and such fallows have low nitrogen content (Adjei-Nsiah *et al.*, 2007). Then, they produce less and lower quality biomass than *Aeschynomene* and maize residues (and sometimes sorghum). These results confirm the well-known importance of the soil organic matter for yam production. Diby *et al.* (2009) reported the high influence of soil organic matter on yam growth and tuber production in forest (high organic fertility soil: 14.4% C at 0-10 cm and 9.75% C at 10-20 cm) and savannah (7.49% and 5.43% C). Organic materials supplied contribute directly to the building of soil organic matter (SOM), which itself improves the physical, chemical and biological composition of the soil (Sanginga and Woomer, 2009). In general, residues from legumes decompose faster than other organic residues, thus contributing to the rapid recycling of nutrients for the subsequent crop. More astonishing is the effect of the perennial fallow of *Gliricidia* (7 years) significantly higher than in the degraded perennial natural fallow (8 years). The perennial fallow of *Gliricidia* would better rebuild the soil organic matter stock than a spontaneous long duration fallow. Indeed, the traditional shifting cultivation and slash-and burn systems contribute to the synergistic effect between the organic residues, the nutrients contained in ashes directly used by the crop, the yam vines staking and the access of the light improving the photosynthetic activity of the crop. The agroforestry system with *Gliricidia* +maize+ *Aeschynomene* under early fire of shrubs produces an additional effect. Incorporating a legume increases the N stock in the soil because of its capability to fix N_2 from the atmosphere. In addition, legumes suppress nematodes and contribute to soil moisture conservation, reduce soil temperature and maintain beneficial microbial community in the rhizosphere. All these factors are important for a better performance of tubers (Obiagwu, 1997). Nye and Greenland (1960) reported the contribution of perennial fallow for soil fertility maintenance showing why fallow with *Gliricidia sepium*, which is a perennial coppice-fallow, was more productive than the perennial natural fallow in the central Benin with some shrubs and woods on the grass carpet. Especially in year 3 when the coppice regenerated whereas, the trees of the perennial natural fallow incinerated, died, and replaced by the *Andropogon* grass.

Profitability of yam-based cropping systems

The yam-based systems with *Gliricidia* fallow under early fire of shrubs (TMGB) showed highest land and cash productivities with net present value levels significantly higher than the other systems, including perennial fallow (T0). These results confirm former works of Bamire and Manyong (2003) and Sodjadan *et al.* (2005) reporting the profitability of intensification technologies with legumes. Nevertheless, the yam-based system with *Gliricidia* fallow (TMGB) requires much more labour than the perennial spontaneous fallow (T0). In fact, labour productivity in TMGB is higher than in TMA and TMAS, but this is lower than in T0. Even after smallholders have adapted this system to reduce the additional labour demand by replacing pruning by early fire, it still constitutes a limiting factor for adoption. Indeed, not all smallholders will anticipate the more than proportional improvement of output and cash generated by the agroforestry system.

Implications of our findings for international application

For international application, technologies including off forest multi-purpose trees (*Gliricidia sepium*, *Moringa oleifera*, *Jatropha curcas*,...) with an adapted density can be used with herbaceous legumes (*Aeschynomene*, *Mucuna*, *S. guianensis*...) or grass, in a dynamics of rotation with seasonal or annual crops (maize, soyabean, yam, cassava, potato, rice, cotton...). Adapted agroforestry systems with early fire can include the crop-livestock integration, the animal or mechanic traction. Our findings will help farmers to save part of their financial resources used for pruning in agroforestry systems or clearing traditional wooded perennial fallows, forests and assure the time economy with a positive impact on soil productivity. In addition, the application will allow to natural resources better preserved, chemical pollution of the environment to be reduced and agricultural production to be diversified. Furthermore, this could contribute to plant biodiversity to be better conserved, bio fuel to be promoted, access of smallholders to land resources to be improved, as well as their capacity to manage these resources. This influence may be strengthened by suitable organizational arrangements to popularize adapted technologies, involving researchers, extension workers and farmers.

Conclusion

Yam yields were significantly higher in rotations with shrubby and herbaceous legumes than in traditional rotations. Interactions factors as treatment, site, variety, year through rainfall regime and smallholders' individual effects and their practices influence significantly yam yields. The system with the highest soil productivity combines *Aeschynomene* and agroforestry with *Gliricidia* but it requires much more labour than the other systems. Systems with *Aeschynomene* without agroforestry supersede systems with a 1-year fallow of *Andropogon* as well as continuous cropping with maize and sorghum. These improved systems should be an alternative to farmers' traditional slash-and-burn and shifting cultivation systems, and then contribute to forest protection from new field clearing. Research is needed to further address simulations on the perennial fallow with *Gliricidia* according to trees density. It would be necessary to study other ways of reducing the workload without the early fire. For example, annual herbaceous legumes could be established including fence-based *Gliricidia* system with trees for yam vines staking.

The part 4 is focussed on general discussions.

Discussions générales

R. Maliki

Partie 4

Discussions générales

L'igname est traditionnellement cultivée sur défriche de la jachère naturelle de longue durée (25 ans et plus) à cause de son exigence en terre fertile (Dumont, 1997). La production connaît une expansion des superficies cultivées par une mise en culture des savanes arborées aux confins des terroirs des villages (saturation foncière) et avec une emprise sur les derniers fronts pionniers pris d'assaut par des producteurs migrants venant de zones cultivées du Sud et du Nord Bénin (Zannou, 2006). Cette tendance n'est pas propre au Bénin, elle s'observe dans tous les principaux pays producteurs d'igname en Afrique de l'Ouest (Berthaud *et al.*, 1997).

L'étude s'est déroulée dans le centre du Bénin, une région ayant une tradition établie en matière de production d'igname au Bénin. Au fur et à mesure que la pression démographique augmente et que la durée de la jachère diminue, les possibilités de nouveaux défrichements se font rares (Adanguidi, 2001). Néanmoins, l'igname est maintenue dans les systèmes de culture, les paysans ayant initié divers modèles pour la culture sédentarisée de cette plante: la rotation avec les céréales ("Ekpoyiyo") ou avec la jachère graminéenne (*Andropogon gayanus*) intégrant l'igname à une récolte (*Dioscorea rotundata*) de la classe 'kokoro', la culture d'igname adaptée au sol hydromorphe dans les bas-fonds, etc.). L'impact agronomique de ces systèmes de culture à base de l'igname dans cette région est mal connu. Par ailleurs, depuis la fin des années 1980s, la gestion des matières organiques basée sur l'utilisation des légumineuses arbustives et herbacées est proposée aux paysans au Bénin (Akakpo *et al.*, 1998; Azontondé *et al.*, 1998 ; Bernard *et al.*, 1998; Floquet *et al.*, 1998, 2001; Carsky *et al.*, 2002; Maliki *et al.*, 1998, 2003). L'originalité de l'étude est d'avoir intégré dans le dispositif expérimental une première série d'adaptations par les producteurs des technologies à base d'igname intégrant les légumineuses (*Aeschynomene histrix*, *Mucuna pruriens* var *utilis*, *Gliricidia sepium*). La question demeure en ce qui concerne la productivité et les facteurs limitant la production dans les systèmes de culture à base d'igname intégrant les légumineuses. L'évaluation de la performance en milieu réel de ces innovations dans le contexte des régions de forte tradition de production d'igname est rarement effectuée d'une manière détaillée.

Plusieurs types de questionnement scientifique émergent: (1) les systèmes adaptés à base d'igname intégrant les légumineuses peuvent-ils assurer des rendements d'igname plus élevés

et stables que les systèmes traditionnels (igname après la défriche forestière sur brûlis, la jachère à *Andropogon gayanus*, le maïs ou maïs+sorgho...) et partant, limiter les risques de déforestation et de pénurie alimentaire? ; (2) ces systèmes peuvent-ils également assurer une utilisation efficace des ressources et ainsi réduire l'impact environnemental? ; (3) quelle est leur gestion et efficacité économique? ; (4) quelle est leur faisabilité (contraintes liées à l'adoption de tels systèmes par les producteurs/productrices)?

L'intérêt principal de ce projet de thèse est de produire des données qui peuvent être utilisées pour modéliser convenablement la relation entre la production des matières organiques, la fertilité des sols et leur conservation et les rendements des cultures (igname) dans la zone centre du Bénin. L'étude propose une estimation de l'impact agronomique de la gestion des matières organiques. Elle vise une meilleure connaissance de la productivité de l'igname et des facteurs influençant la production dans les systèmes de cultures intégrant les légumineuses.

Le projet de thèse a bénéficié de l'appui financier du Gouvernement français dans le cadre de la bourse SCAC gérée par l'organisme EGIDE dans un système d'alternance entre la Faculté des Sciences Agronomiques (FSA) de l'Université d'Abomey-Calavi et le CIRAD (Centre de Coopération internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) de Montpellier, PS4, production fruitière et horticole. Le projet de thèse a bénéficié également de l'appui financier du Programme CORUS (Coopération en Recherche Universitaire et Scientifique), du Projet d'Appui à la Diversification des Systèmes d'Exploitation (PADSE), du projet de Développement des Plantes à Racines et Tubercules (PDRT) et des projets de Coopération technique avec l'Organisation des Nations-Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) et l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA).

L'étude a été conduite sur les sols de type ferrugineux tropical dans la région soudano-guinéenne au Centre du Bénin. Elle est comprise entre la latitude 7°45' et 8°40' Nord et la longitude 2°20' et 2°35' Est. La zone est caractérisée par des durées des occupations humaines et densités de peuplement différenciées. Les sites de Miniffi et Gomè sont situés dans la zone de colonisation ancienne avec une densité de population de 49 habitants/km². Ceux de Boubou, Adjanoudoho, Akpéro, Dani, Gbanlin et Magoumi sont situés dans la zone de colonisation récente avec une densité moyenne de 25 habitants/km². Les sites de Gomè et Magoumi sont sis dans un bas-fond et les autres sur un plateau. Gbanlin présente un relief vallonné. Les précipitations annuelles moyennes sur les sites varient entre 800 mm et 1500 mm avec une répartition inégale des pluies.

Les systèmes de jachère plantée avec les légumineuses ont été comparés aux systèmes de jachères naturelles et aux rotations avec les céréales. Deux types de dispositifs expérimentaux conduits par les producteurs ont été évalués au cours des campagnes 2002-2005 et 2007-2010 au centre du Bénin:

- (1) Les systèmes traditionnels de production d'igname *Dioscorea rotundata* tardive de la classe 'Kokoro' (rotation d'1 an de jachère à *Andropogon gayanus*-igname; rotation maïs + 100 kg N₁₄P₂₃K₁₄ + 50 kg urée-igname) ont été comparés aux systèmes promus par la recherche intégrant les légumineuses herbacées (rotation *Aeschynomene histrix* /maïs + 100 kg N₁₄P₂₃K₁₄ + 50 kg urée – igname ; rotation *Mucuna pruriens* var *utilis*/maïs + 100 kg N₁₄P₂₃K₁₄ + 50 kg Urée – igname) au cours des campagnes 2002-2003 et 2004-2005 sur quatre sites (Miniffi, Gomè, Akpéro et Gbanlin).
- (2) les systèmes améliorés adaptés par les petits producteurs (rotation maïs+*Aeschynomene*+*Gliricidia*-igname sur feu précoce des arbustes, rotation maïs+*Aeschynomene*-igname et rotation maïs+*Aeschynomene*+sorgho-igname) ont été comparés chacun à leur système traditionnel de référence (rotation jachère arbustive longue-igname sur défriche-brûlis, rotation maïs+*Aeschynomene*-igname et rotation maïs+*Aeschynomene* +sorgho-igname) au cours des campagnes 2007-2008 et 2009-2010. Trois variétés d'igname (*Dioscorea rotundata* précoce, *Dioscorea alata* tardive et *Dioscorea rotundata* tardive) ont été testées sur les sites (Adjanoudoho, Akpéro, Boubou, Dani, Gbanlin, Gomè, Magoumi et Miniffi). L'âge du système traditionnel de jachère arbustive et celui de la jachère à base de *Gliricidia* sont de 8 et 7 ans respectivement.

Le bloc randomisé pour les expérimentations et le modèle partiellement hiérarchisé à 5 facteurs sont utilisés au cours des campagnes (2002-2005) et à 6 facteurs considérés en 2007-2010: année, répétition, producteur, site, traitement et variété. Les facteurs aléatoires sont "année" "répétition", "site" et "producteur" considérés comme subordonnés au "site". Les facteurs fixes concernent "traitement" et "variété". Des échantillons de sols et plantes ont été collectés et analysés dans le Laboratoire des Sciences du Sol, Eau et Environnement (LSSEE) du CRA-A de l'INRAB et les laboratoires de l'INRA et du CIRAD de Montpellier en France. Des analyses de données collectées ont été effectuées avec une série d'outils. ANOVA a été appliquée avec le Modèle Linéaire Général pour l'évaluation de l'influence des facteurs et de leurs interactions sur la production de l'igname. Les effets des traitements sur la production de biomasse et les propriétés physico-chimiques des sols ont été déterminés par les analyses de variance utilisant le SPSS. Les modèles de régression linéaire multiple et de fonction frontière

de production ont été appliqués pour les déterminants de la variabilité et de l'écart à l'optimum des rendements. La main d'œuvre, sa productivité, le ratio bénéfice-coût et les revenus nets actualisés des systèmes ont été également évalués. Des entretiens de groupes avec les personnes ressources et acteurs clés au niveau village, des entretiens individuels dans 306 ménages agricoles ont été conduits. Au cours des enquêtes, la fréquence relative et la matrice d'hierarchisation ont été utilisées pour l'évaluation des contraintes contingentes des systèmes.

Les aspects discutés dans le document s'articulent autour des points suivants :

- production de matière sèche des légumineuses dans les systèmes de culture à base d'igname;
- recyclage et exportation des éléments minéraux, bilan net d'azote dans les systèmes de culture à base d'igname intégrant les légumineuses;
- impact des systèmes de cultures à base de légumineuses sur les propriétés du sol;
- production d'igname dans les systèmes de culture à base d'igname intégrant les légumineuses;
- variabilité et les gaps de rendement d'igname affectés par les conditions de fertilité de sols, la gestion des cultures et le climat dans les systèmes de culture intégrant les légumineuses herbacées;
- rentabilité économique des systèmes de cultures à base d'igname intégrant les légumineuses;
- contraintes contingentes liées à l'adoption des systèmes de cultures à base d'igname intégrant les légumineuses.

Production de matière sèche des légumineuses dans les systèmes de culture à base d'igname

Le système de culture herbacée intégrant le *Mucuna* a produit plus de biomasse aérienne. Nous avons obtenu une production de matière sèche aérienne de maïs/*Mucuna* plus élevée (9,3 t ha⁻¹ année⁻¹) suivie de celle de maïs/*Aeschynomene* (8,8 t ha⁻¹ année⁻¹), de jachère naturelle à *Andropogon* (4 t ha⁻¹ année⁻¹) et de maïs (3,3 t ha⁻¹ année⁻¹). Les résultats démontrent la performance agronomique de *Mucuna*, en terme de production de matière sèche

comparée à *Aeschynomene* en accord avec les résultats d'études antérieures (Carsky *et al.*, 1998, Azontondé *et al.*, 2003; Sodjadan *et al.*, 2005). En effet, *Mucuna* pousse rapidement et atteint sa maturité physiologique comparée à *Aeschynomene*. *Mucuna* grimpe et ses lianes s'enroulent autour des tiges de maïs en culture associée ou d'arbustes servant de tuteurs. Ce pourquoi le semis du *Mucuna* 45 jours après celui du maïs est adopté par les producteurs pour limiter la compétition du point de vue lumière et éléments nutritifs. Après la récolte du maïs, le *Mucuna* poursuit son cycle de développement. Les tiges de maïs érigées permettent à la plante d'exposer plus de surface foliaire aux radiations solaires améliorant ainsi son activité photosynthétique et sa productivité. *Mucuna* atteint la maturité physiologique (temps de floraison) entre 180 et 240 jours après la plantation dans la zone d'étude comparée à *Aeschynomene* (200- 306 jours) (Maliki *et al.*, 2007a, 2007b).

Les résultats de l'étude ont révélé également une bonne performance du système traditionnel de jachère forestière et du système de jachère plantée à base de *Gliricidia*. La performance de *Gliricidia* varie en fonction de l'âge et des modes de gestion. En effet, dans une jachère de 7 ans (en moyenne) de *Gliricidia* avec usage de feu précoce au pied des arbustes intégrant le maïs/*Aeschynomene*, la production de biomasse foliaire totale (maïs/*Aeschynomene*/*Gliricidia*) est de 18,4 t ha⁻¹. Cette pratique paysanne supprime la charge de travail liée aux émondages, favorise le dégarnissage des arbustes (défoliation), l'accès à la lumière et l'accumulation des feuilles sèches non consommées de *Gliricidia* au sol. Cette pratique adaptée permet également le renouvellement des plantations âgées montrant de gros fûts des arbustes de *Gliricidia* et mobilisant plus d'espace de culture. Cependant, une chute de la biomasse du système agroforestier est observée au cours de la campagne suivante suite au feu précoce (9,3 t ha⁻¹). Le système adapté de production d'igname intégrant le *Gliricidia* est auto-reproductible montrant un taux de reprise de la plantation de plus de 80% après le feu précoce au pied des arbustes et une croissance exponentielle de nouveaux plants émergeant de la racine des arbustes par opposition aux systèmes traditionnels de défriche forestière sur brûlis entraînant la mort systématique des arbres. Les tiges sèches et vivantes des arbustes allant jusqu'à 7 m de haut ou plus assurent le tuteurage de l'igname les campagnes suivantes. La pratique du système agroforestier dans une dynamique d'assolement rotation au sein de l'exploitation agricole permet d'assurer la production de biomasse fertilisante. Le système traditionnel de jachère forestière de 8 ans (en moyenne) montre une biomasse foliaire de 16,8 t ha⁻¹ laissant place la campagne suivante à une jachère graminéenne à *Andropogon gayanus* (2,8 t ha⁻¹) suite à l'incinération décimant les arbustes (partie 3). Les résultats de nos travaux ont montré également que lorsque la jachère de *Gliricidia* est établie sur 2 à 3 ans comme

précédent pour l'igname sans feu précoce, une production ligneuse moyenne de $2 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ est obtenue contre une production d'émundes de *Gliricidia* de 4 t ha^{-1} . Dans ce cas, les producteurs coupent les arbustes à 0,5 m du sol. L'essence agroforestière étant à croissance rapide, les producteurs éliminent les gourmands et maintiennent une seule tige de *Gliricidia* pour le tuteurage de l'igname. Ce mode de coupe au ras permet, en particulier, aux agro-éleveurs des bœufs de trait de conduire aisément la traction animale pour le billonnage sur sole de *Gliricidia*. Lorsque le *Gliricidia* est coupé à 1,5 m du sol dans une plantation de 2 ans sans feu précoce incluant 2 à 4 élagages au cours du cycle de production de l'igname, la quantité annuelle moyenne d'émundes de *Gliricidia* produite est de $2,5 \text{ t ha}^{-1}$ (Maliki *et al.*, 2004 ; Maliki, 2006). Les travaux antérieurs conduits ailleurs, ont révélé des résultats similaires de production de biomasse foliaire dans les systèmes de culture en couloirs à base de *Gliricidia* (Kang et Reynolds, 1986; Budelman, 1991, Atta-Krash *et al.*, 1998 ; Osakwe, 1998 ; Atta-Krah et Sumberg, 1998). Les travaux d'Atta-Krah et Sumberg (1998) à Ibadan au sud ouest du Nigeria ont révélé une production d'émundes de $2,8$ à $3,6 \text{ t ha}^{-1}$ dans les couloirs de *Gliricidia* de 2 ans suite à 2 ou 3 élagages des arbustes. En outre, les travaux d'Osakwe (1998) au Nigeria ont montré une production totale de biomasse foliaire de *Gliricidia/Brachiaria* (23 t ha^{-1}), *Gliricidia/Panicum* (21 t ha^{-1}) et *Gliricidia/Pennisetum* (13 t ha^{-1}) dans des plantations beaucoup plus âgées.

Fixation symbiotique d'azote, recyclage et exportation des éléments minéraux, bilan net d'azote dans les systèmes de culture à base d'igname intégrant les légumineuses

Les bilans nets d'azote négatifs et des niveaux bas des macroéléments recyclés sont observés dans les systèmes traditionnels à maïs (N, P et K : $32,7 \text{ kg}$, $4,6$ et $17,4 \text{ kg ha}^{-1}$) et à jachère d'*Andropogon gayanus* (N, P et K : $47,3 \text{ kg}$, $5,2$ et $19,7 \text{ kg ha}^{-1}$) avec la variété *Dioscorea rotundata* tardive de la classe 'kokoro' (Chapitre 2.1.).

Les quantités des macroéléments recyclées, le bilan net d'azote dans les systèmes d'association de culture maïs/*Mucuna* sont significativement plus élevés (N, P et K : $165,5 \text{ kg}$, $15,5$ et $55,5 \text{ kg ha}^{-1}$ et net N : $36,1$ à $66,6 \text{ kg ha}^{-1}$) contre (N, P et K : $142,2 \text{ kg}$, $12,8$ et $52,0 \text{ kg ha}^{-1}$ et net N : $23,5$ à $47,7 \text{ kg ha}^{-1}$) pour le système maïs/*Aeschynomene*.

Les quantités de macroéléments exportés (N, P et K : $29,0 \text{ kg}$, $3,0 \text{ kg}$ et $32,1 \text{ kg ha}^{-1}$) ou recyclés par l'igname (N, P et K : $20,8 \text{ kg}$, $2,6 \text{ kg}$ et $26,1 \text{ kg ha}^{-1}$) sont significativement améliorés dans les systèmes à légumineuses en comparaison avec les quantités de macroéléments exportés (N, P et K : $15,5 \text{ kg}$, $1,6 \text{ kg}$ et $17,1 \text{ kg ha}^{-1}$) ou recyclés par l'igname

(N, P et K : 11,1 kg, 1,4 kg et 13,9 kg ha⁻¹) dans les systèmes traditionnels (maïs et 1-an de jachère d'*Andropogon gayanus*).

Les niveaux estimés de N₂ fixés par *Mucuna* dans notre zone d'étude sont significativement supérieurs (66,6 kg – 97,3 kg ha⁻¹) à ceux d'*Aeschynomene* (53,9 kg – 81,2 kg ha⁻¹) mais relativement bas aux résultats rapportés par d'autres études (Carsky *et al.* 2001, Giller, 2001; Adjei-Nsiah *et al.*, 2007). Une synthèse bibliographique des travaux de recherche a révélé que le *Mucuna* fixe plus de 100 kg N ha⁻¹ dans les régions humides et subhumides à sol acide ou déficient en phosphore (Carsky *et al.* 2001, Giller, 2001).

Le taux de fixation de N₂ serait directement lié au taux de croissance des légumineuses. L'insuffisance d'humidité du sol aussi bien que l'excès d'eau exercerait un effet prononcé sur la croissance des légumineuses et partant, sur la fixation de N₂. Le déclenchement, la croissance, et l'activité des nodules sont tous plus sensibles au stress hydrique qu'au métabolisme général au niveau des racines et des feuilles (Albrecht *et al.*, 1981). *Aeschynomene* réduit la fixation de N une fois soumis au déficit hydrique du sol (Albrecht *et al.*, 1981). Sellstedt *et al.* (1993) ont constaté que N dérivé de la fixation de N₂ diminuait de 26% environ en raison de l'insuffisance de l'eau. Enfin, P, très déficient dans le contexte des sols de notre étude, semble être essentiel pour la nodulation et la fixation de N₂ (Pereira et Bliss, 1989): avec N, c'est l'un des principaux facteurs limitant le rendement en éléments minéraux dans de nombreuses régions du monde.

Ces résultats confirment les travaux de Sodjadan *et al.* (2005) conduits au Togo et au Bénin qui ont révélé que la jachère de *Mucuna* par rapport à *Aeschynomene* et *Pueraria* a réalisé l'accumulation biologique d'azote plus élevée de l'ordre de 91 à 120 kg ha⁻¹. Les travaux d'Adjei-Nsiah *et al.* (2007) au Ghana ont aussi rapporté une contribution substantielle au bilan net de N du système de culture *Mucuna*/maize/*Mucuna* (196 kg ha⁻¹). Le système maïs-maïs-maïs au Ghana montre un bilan net d'azote négatif (-48 kg ha⁻¹) en concordance avec nos résultats sur le précédent maïs (entre -31,5 kg et -34,9 kg ha⁻¹). L'accumulation de N serait liée au caractère très prolifique de *Mucuna*, à sa forte capacité de fixation symbiotique comparée à *Aeschynomene* et à sa décomposition plus rapide. Au Ghana, étudiant l'effet des cultures séquentielles avec le manioc et les légumineuses, Adjei-Nsiah *et al.* (2007) ont indiqué que seulement 30% de *Mucuna* reste six semaines après l'incorporation de la biomasse.

Impact des systèmes de cultures à base de légumineuses sur les propriétés du sol

L'état de fertilité initial des sites est faible. En effet, les échantillons de sol de 2002 et 2007 prélevés avant la mise en place des légumineuses selon les profondeurs (0-10 et 10-20 cm) et (0-15 et 15-30 cm) respectivement montrent des niveaux de concentration faibles de la matière organique du sol dans tous les champs (0,58 à 2,25%), de P disponibles (2,0 à 20,1 ppm), de N (0,021 à 0,112%) et de K^+ (0,06 à 0,27 meq/100g de sol). La capacité d'échange cationique de ces sols varie de 2,10 à 5,06 meq/100g de sol (Chapitre 2.1 et Partie 3). L'azote est l'élément le plus déficient de ces sols cultivés à faible teneur en matière organique. Yekini (1991) a rapporté que la déficience en azote totale de ces sols réside dans le fait que l'azote est le seul élément nutritif majeur à ne pas préexister dans la roche mère. Aussi, le transfert de l'azote atmosphérique vers le sol par processus biologique et chimique est-il lent. Les pertes d'azote dans ces sols sont fréquentes à cause du caractère très volatil et soluble de cet élément. Les concentrations des sols en macroéléments (N, P et K) et en matière organique du sol (MOS) sont plus élevées sur les sites de Boubou, Gbanlin et Akpéro proches des fronts pionniers. Le site de Gomè, en particulier, présente des concentrations plus faibles en ces éléments. Ce site sis dans un bas-fond montre une capacité d'échange cationique relativement faible corrélée au taux de MOS et aux bases échangeables (K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+}). Partant, les éléments nutritifs sont faiblement retenus par le complexe argilo-humique (CAH). Ils sont rapidement lessivés par suite des précipitations. Le niveau de concentration relativement élevé en Al^{3+} observé en 2007 sur le site de Gomè explique la tendance à l'acidification de ce sol avec un pH (KCl) moyen de 4,5 (Partie 3). D'où la nécessité de la fertilisation organo-minérale pour ces sols.

L'utilisation des légumineuses améliore les niveaux de concentration des paramètres du sol. L'accroissement des concentrations en argile est de 0,27% (Chapitre 2.3.). Cette amélioration de la concentration en argile au bout de deux campagnes agricoles serait liée au prélèvement sur les buttes des échantillons composites de sol résultant du brassage de la couche profonde du sol relativement riche en argile et celle d'horizon de surface suite au buttage. En effet, le buttage permet d'augmenter le volume de la couche profonde du sol et d'incorporer les résidus organiques au sol. Les analyses des propriétés chimiques des sols montrent des valeurs significativement élevées en MOS%, N %, P (ppm), K^+ cmol kg^{-1} et pH eau dans les systèmes de rotation à base d'igname intégrant les légumineuses *Mucuna* (TMM) et *Aeschynomene* (TMA) comparés aux systèmes traditionnels à *Andropogon* (T0) et au

précédent maïs (TM). Les concentrations en MOS, N, P, K et pH sont accrues en TMM et TMA de (0,15; 0,02; 19; 29 et 10%) respectivement.

Les bilans des macroéléments sont négatifs dans les systèmes traditionnels. Exception faite du système de rotation à maïs montrant un bilan positif en phosphore. Ceci serait lié à l'apport de l'engrais inorganique. Les bilans des macroéléments varient de -71,9 à -38 kg N ha⁻¹, -2,1 à 3,4 kg P ha⁻¹ et -12,1 à -2,7 kg K ha⁻¹ dans les systèmes traditionnels à *Andropogon* ou à maïs (T0, TM) contre 33,0 à 44,4 kg N ha⁻¹, 10,1 à 11,5 kg P ha⁻¹ et 4,1 à 9 kg K ha⁻¹ dans les systèmes intégrant les légumineuses à *Mucuna* ou *Aeschynomene* (TMA, TMM).

La prédiction du bilan humique sur un horizon de planification de 40 ans (cycle de vie moyen d'une exploitation agricole dans la zone) a révélé que la pratique des systèmes de culture à base d'igname intégrant les légumineuses accroît le taux de matière organique du sol (MOS) variant de 0,25 à 1,80% contre -0,21 à 1,47% dans les rotations à *Andropogon* et maïs. Prenant en compte le niveau moyen du taux de matière organique initial du sol dans la zone d'étude, les concentrations de matière organique du sol selon l'horizon de planification de 40 ans varieraient entre 1,8 à 3,4% dans les systèmes avec les légumineuses contre 1,3 à 3,0% dans les systèmes traditionnels à *Andropogon* ou maïs.

Ces résultats sont en accord avec ceux d'études antérieures. Les engrais organiques incorporés au sol contribuent directement à la constitution de la MOS, qui à son tour assure diverses fonctions en améliorant la composition physique, chimique et biologique du sol (Sanginga et Woome, 2009). Snapp *et al.* (1998) ont signalé qu'approximativement 7 t ha⁻¹ an⁻¹ de matière sèche de résidus de qualité (racines, tiges) ou 10 t ha⁻¹ an⁻¹ de résidus de qualité (feuilles d'engrais vert) sont nécessaires pour maintenir un niveau organique de 1.0% C dans un sol sablo-argileux dans les tropiques subhumides (assumant 0,05 fraction décomposée par an). Il est admis qu'un taux de 1,5 % est la limite critique théorique, en dessous de laquelle la fertilité diminue rapidement. Il est souvent souhaitable de viser à maintenir un taux minimal de 2,5 % en général et même de 3,5 à 4 % dans les sols lourds (Doucet, 2006). Les résultats de notre étude montrent une fourchette de taux de MOS en adéquation avec la norme requise dans les systèmes à légumineuses. De façon générale, un taux de 4 à 8 % de matière organique correspond à une bonne productivité et à une bonne capacité de minéralisation. Cependant, de hautes teneurs en matière organique peuvent être révélatrices de mauvaises conditions de croissance si elles sont associées à de mauvaises conditions de drainage. De plus, un niveau élevé de matière organique peut induire une trop forte rétention en eau et favoriser le développement de certaines maladies (CRAAQ, 2003).

En outre, les légumineuses en particulier le *Mucuna* améliorent le niveau de N du sol par la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique (Sanginga *et al.*, 1996 ; Sanginga, 2003; Adjei-Nsiah *et al.*, 2007). Les jachères à base de *Mucuna* sont connues spécialement pour leur contribution à l'amélioration du niveau des fractions de P disponibles dans le sol pour les cultures subséquentes (Salako et Tian, 2003). Néanmoins, cela dépend des niveaux de P inhérents dans le sol. Les exsudats racinaires de *Mucuna* pourraient solubiliser le P accroissant sa disponibilité. Les interactions plante-sol telles que l'augmentation de la surface racinaire en contact avec la solution du sol, le phosphore réorganisé sous forme organique, les interactions avec les microorganismes bio fertilisants tels que les champignons (mycorhizes), la modification de la rhizosphère du sol grâce à la matière organique améliorent la disponibilité du phosphore dans le sol (Ohwaki and Hirata, 1992; Hinsinger, 1998). L'apport de la matière organique améliore le pH du sol et contribue à la libération du phosphate de calcium du sol. Dans une étude conduite par Nziguheba *et al.* (1998), il a été confirmé que la matière organique réduit la capacité d'adsorption de P des sols améliorant ainsi les rendements dans les sols déficients en cet élément. Quant au K, Igué (2000) a révélé que la concentration en cet élément dans la zone d'étude est de 0,82 cmol kg⁻¹ dans les 0-20 cm de la couche du sol et décline significativement avec les activités culturales. Le taux de chute observé est de 0,023-0,054 cmol kg⁻¹ an⁻¹ à 0-20 cm de la couche du sol (Igué, 2000).

Toutefois, l'érosion du sol (12,2 t ha⁻¹ an⁻¹) et d'éléments nutritifs (9,3 kg N, 1,4 kg P, et 4,7 kg K ha⁻¹ an⁻¹) entre les buttes d'igname est observée sous la rotation avec *Andropogon gayanus* (T0). Elle est significativement plus élevée que dans les systèmes de rotation maïs/légumineuses (TMA, TMM) ou maïs (TM). Ces derniers montrent une perte moyenne de sol (10,3 t ha⁻¹ an⁻¹) et une perte d'éléments nutritifs (7,8 kg N, 1,1 kg P, et 3,9 kg K ha⁻¹ an⁻¹). Ceci pourrait s'expliquer par la contribution des tiges et racines plus lignifiées de maïs induisant une décomposition modérée limitant ainsi les pertes du sol par érosion. Des niveaux d'érosion du sol entre les buttes d'ignames allant jusqu'à 24 t ha⁻¹ an⁻¹ peuvent être observés entraînant des pertes d'éléments nutritifs pour cause de la destruction mécanique de la structure du sol lors du buttage. Ceci est en adéquation avec les résultats d'étude conduite par Hiepe and Jungle (2003) dans la zone montrant une moyenne à long terme de perte de sol de 20–27 t ha⁻¹ an⁻¹ calculée avec l'équation universelle de perte de sol (USLE). D'où la nécessité d'entrevoir aussi des alternatives de production d'igname combinant l'incorporation et le paillage (mulching) de la matière organique dans les systèmes de culture à base d'igname sur buttes. La recherche pourrait aussi s'orienter sur les alternatives de production d'igname

dans les systèmes sur couverture végétale sans labour avec la possibilité d'intégration agriculture-élevage (Cornet *et al.*, 2009).

L'effet du système agroforestier sur les paramètres du sol n'a pas été évalué. L'étude conduite par Beedy *et al.* (2010) dans une jachère de *Gliricidia* de 14 ans en association avec le maïs (*Gliricidia*/maïs) sur un Lixisol Ferrique dégradé au sud de Malawi (Afrique du sud) a révélé une amélioration du statut organique et nutritif des sols dans l'horizon de (0-20 cm). Les producteurs dans le cadre de notre étude témoignent que les sols sous *Gliricidia* présentent un aspect meuble, grumeleux justifiant une bonne amélioration de la fertilité de ces sols et des rendements d'igname obtenus (Partie 3 et figure 4).

Production d'igname dans les systèmes de culture à base d'igname intégrant les légumineuses

Les résultats de notre étude montrent une rapide diminution des rendements d'igname de la jachère forestière sur brûlis au précédent maïs/sorgho y compris la jachère dégradée à *Andropogon*. Ceci confirme les résultats de Carsky *et al.* (1998, 2001) qui ont obtenu un rendement de 10 t ha⁻¹ approximativement pour l'igname cultivée après la défriche d'une jachère de 3 ans, suivi d'un taux de chute progressif de rendement les années subséquentes. Dans la zone des savanes au Nigeria, Watson et Goldsworthy (1964) ont indiqué un rendement d'igname de 11 t ha⁻¹ après une jachère naturelle de 3 ou 4 ans et moins de 6 t ha⁻¹ après une jachère d'un ou de deux ans.

Les différents essais ont permis d'évaluer les performances de l'igname après les jachères plantées avec les légumineuses (*Gliricidia*, *Mucuna* et *Aeschynomene*), la jachère dégradée à *Andropogon* et les rotations maïs et maïs/sorgho. Dans les essais de 2008 et 2010, le système agroforestier maïs/*Aeschynomene*/*Gliricidia* montre des rendements d'igname significativement différents (17,7 t à 32 t ha⁻¹ de MF) comparé au système traditionnel de défriche sur brûlis (15 t à 23,5 t ha⁻¹) pour différentes variétés (*Dioscorea rotundata* précoce, *Dioscorea alata* tardive et *Dioscorea rotundata* tardive). La jachère à *Mucuna* ou *Aeschynomene* a montré une bonne performance de rendement de l'igname comparée à la jachère dégradée à *Andropogon* et aux rotations maïs ou maïs/sorgho dans les essais de 2003 - 2005 et 2008 - 2010. En effet, les systèmes de jachère intégrant les précédents *Mucuna*/maïs et *Aeschynomene*/maïs avec application d'engrais sur le maïs augmentent significativement les rendements de l'igname d'environ 40% (15 t ha⁻¹ de matière fraîche contre moins de 9 t ha⁻¹ dans la jachère naturelle avec *Andropogon gayanus*) (Chapitre 2.2.). La production de la

matière sèche (MS) de l'igname (tubercules) est significativement plus élevée dans les systèmes intégrant les légumineuses *Mucuna* et *Aeschynomene* (en moyenne 7,6 t ha⁻¹ contre 4,1 t ha⁻¹ soit 47% de surplus de MS de tubercules d'igname) que dans les systèmes traditionnels (Chapitre 2.3.). Le rendement d'igname est significativement plus élevé en 2005 qu'en 2003 révélant un effet significatif de l'interaction année× traitement ($P < 0,01$). La biomasse aérienne recyclée et accumulée de 2002 à 2004 dans les systèmes d'association maïs-légumineuses pourrait entraîner un effet cumulatif de l'eau et des éléments minéraux, et partant induire la croissance et la production de matière sèche.

Ces résultats confirment l'importance de la matière organique du sol (Sanginga et Woomer, 2009). Dans la région centrale de la Côte d'Ivoire, Diby *et al.* (2009) ont rapporté l'influence de la matière organique du sol sur la croissance et la production des tubercules d'igname en forêt (niveau de fertilité élevé du sol : 14,4% C à 0-10 cm et 9,75% C à 10-20 cm) et en savanes (7,49% et 5,43% C).

L'igname bénéficie-t-il de l'effet de l'engrais chimique appliqué ? L'arrière effet de l'engrais chimique n'est pas observé dans le cadre des essais conduits en 2002 et 2005. Les observations conduites par Maliki (2007) en milieu contrôlé dans la zone d'étude avec plusieurs traitements: (*Mucuna*, 1 ou 2 ans d'*Aeschynomene* ou de *Stylosanthes*), *Gliricidia* avec 1 ou 2 ans de jachère à *Andropogon*, précédents (soja, niébé, paille de riz) combinés avec deux niveaux d'engrais (0; 100 kg ha⁻¹ NPK 14 23 14) appliqués trois semaines après la plantation des semenceaux d'igname n'ont pas révélé un effet significatif de l'engrais sur le rendement de l'igname. Par exemple, les systèmes *Gliricidia* avec 2-ans d'*Andropogon*-igname et *Gliricidia* avec 2-ans d'*Andropogon* + 100 kg NPK 14-23-14-igname ont montré des rendements d'igname de 19,5 t et 22 t ha⁻¹ respectivement pour la variété améliorée TDr 95/18544 (*Dioscorea cayenensis-rotundata*) sans différence significative au seuil de 5%. Les rendements plus faibles (en moyenne 9,7 t ha⁻¹) ont été observés sur les rotations avec les légumineuses alimentaires (soja, niébé) et pailles de riz.

La synthèse de plusieurs travaux de recherche montre que l'effet de la fertilisation minérale sur le rendement de l'igname est lié aux pratiques culturales et conditions agro-écologiques (le type d'engrais appliqué, le niveau et le mode d'application des engrais, les conditions pédoclimatiques en savane ou en forêt). Ainsi au Trinidad, Chapman (1965), a obtenu un accroissement de 30% de rendement de tubercules d'ignames lorsque l'application de l'engrais azoté est retardée jusqu'à trois mois après la plantation de l'igname. Au Bénin, Srivastava *et al.* (2010) ont révélé que le rendement d'igname est accru lorsque les résidus de récolte et la fumure ont été appliqués, mais en bonnes conditions pluviométriques (bon niveau

et bonne répartition des précipitations). Dans une étude conduite sur deux ans, Obigbesan *et al.* (1977) obtiennent des réponses positives à la fertilisation potassique (K) avec trois espèces d'igname à l'Ouest du Nigeria. Diby *et al.* (2004) ont rapporté l'influence des propriétés du sol sur la croissance de l'igname et la production des tubercules en Côte d'Ivoire. Dans ce cadre, deux espèces (*D. alata*, *D. cayenensis-rotundata*) ont été suivies dans deux zones agro-écologiques (forêt et savane). L'application des engrais minéraux a amélioré la production de matière (MS) des deux espèces dans la zone des savanes uniquement. En outre, plusieurs travaux ont montré des effets positifs des engrais minéraux sur le rendement d'igname (Djokoto et Stephens, 1961; Horn *et al.*, 2005 cités par Cornet *et al.*, 2005). Au contraire, Gbedolo (1986) a révélé que les expérimentations au Bénin à base d'igname intégrant les engrais minéraux produisent rarement des résultats significatifs.

La variabilité et l'écart à l'optimum de rendement d'igname affectés par les conditions de fertilité des sols, la gestion des cultures et le climat

Dans le cadre de cette analyse sur la variabilité et l'écart à l'optimum de rendement d'igname, nous avons utilisé la régression linéaire multiple et la fonction frontière de production. L'analyse de la fonction frontière de production a révélé des rendements d'igname élevés de 13,5 à 22,9 t ha⁻¹ dans les systèmes améliorés par rapport aux systèmes traditionnels. Les écarts à l'optimum de rendement de l'igname observés variaient de 3 à 14 t ha⁻¹ de matière fraîche; ils sont réduits dans les systèmes de culture intégrant les légumineuses.

La production d'igname est affectée par les conditions de fertilité des sols, de pluviométrie et de gestion de la culture (Chapitre 2.4). La matière organique des sols (MOS) et la biomasse des légumineuses incorporée lors de la confection des buttes expliquent 20 et 40% des variations de rendement observées respectivement à Miniffi et Gomè. La concentration en potassium (K) de la biomasse incorporée explique 40 à 75% des variations de rendement sur les sites de Miniffi, Gbanlin et Akpéro. Les précipitations ou la MOS contribuent à environ 4% des variations de rendement sur tous les sites.

Dans les conditions agro-écologiques de la zone d'étude, les analyses de régression linéaire multiple et de fonction frontière de production ont toutes identifié les conditions de fertilité des sols (MOS, phosphore, biomasse organique, biomasse K) comme facteurs importants affectant la production d'igname. Selon le poids relatif des variables dans le modèle global de régression linéaire multiple, une amélioration de 1% du taux de MOS

entraîne un accroissement de 3 t ha⁻¹ de matière fraîche (MF) d'igname. Sur le site de Miniffi, en particulier, une variation de 1% du taux de MOS entraîne un accroissement de rendement de l'igname de 8,8 t ha⁻¹ de (MF). Un accroissement de 1% du taux de phosphore du sol sur le site de Gbanlin entraîne une amélioration du rendement d'igname de 4,9 t ha⁻¹ de (MF). En outre, un accroissement de 1% de la biomasse organique des légumineuses incorporée améliore le rendement d'igname de 0,4 t ha⁻¹ sur tous les sites, et de 1 t ha⁻¹ de (MF) sur le site de Gomè. Une variation de 1% du taux de potassium contenu dans la biomasse organique des légumineuses incorporée entraîne une amélioration de rendement de l'igname de 0,125 t ha⁻¹ de (MF) sur tous les sites.

L'analyse de corrélation a montré une forte relation entre les précipitations pendant les 6 premiers mois (Pluvio_6) après la plantation d'igname et celles pendant les 12 mois du cycle de production de la culture (Pluvio_12). L'insolation (heures an⁻¹) enregistrée est fortement corrélée aux précipitations et n'exerce donc pas d'effet distinct. D'autres facteurs climatiques dont notamment la température moyenne (°C) et l'hygrométrie (%) montrent une similarité selon les sites et années durant le cycle de production de l'igname et leur effet n'a donc pas pu être étudié. Les précipitations ont été identifiées comme facteurs importants expliquant la variabilité de rendement sur différents sites dans les modèles d'analyse de fonction frontière de production, et comme troisième contrainte importante dans le modèle global de régression linéaire multiple. Les interactions année × traitement marquées par la variabilité des précipitations influencent le rendement d'igname dans la zone d'étude.

L'intensité d'utilisation des terres affecte négativement le rendement d'igname pour l'ensemble des données relatives au modèle global de régression linéaire multiple. Ceci serait dû à l'impact de l'intensité d'utilisation de la terre sur la dégradation de la fertilité du sol notamment l'épuisement de la MOS et des éléments minéraux (exportation des éléments minéraux par les récoltes, la lixiviation et l'érosion). Les petits exploitants pratiquent les systèmes de culture continue et exportent à travers les récoltes des quantités importantes de nutriments des sols sans une bonne restitution organique ou minérale (Saidou, 2006).

La gestion des adventices a été identifiée comme un facteur important expliquant la variabilité de rendement sur différents sites dans le modèle d'analyse de fonction frontière de production et son importance varie entre les sites et les années (Chapitre 2.4.). La gestion des adventices affecte significativement le rendement d'igname dans le modèle de régression linéaire multiple de Gbanlin. Beale *et al.* (1988) ont rapporté que la sensibilité de la culture aux herbes indésirables semble être maximale entre deux et trois mois après la germination de l'igname. Bien que trois opérations de sarclages des adventices soient recommandées durant le

cycle de croissance de la plante, les petits exploitants dans le cadre de notre étude pratiquent dans leur champ 2 à 4 sarclages. Généralement, les études ont indiqué que les légumineuses herbacées suppriment la germination des graines des adventices et contrôlent l'enherbement (Chikoye and Ekeleme, 2001; Chikoye *et al.*, 2002).

Les rendements d'ignames sont également affectés par d'autres facteurs de gestion (durée de la culture, densité de la culture, hauteur des buttes) mis en évidence dans les modèles de régression linéaire multiple (Chapitre 2.4.). La durée de la culture (nombre de jours entre la plantation d'igname et la récolte) affecte positivement les rendements d'igname dans le modèle de régression de Gbanlin et celui relatif à tous les sites de la zone d'étude. Autrement dit, une plantation précoce d'igname (octobre - décembre) est bénéfique pour la croissance et le développement de la culture.

Il ressort des résultats de l'étude que la variabilité et l'écart à l'optimum de rendement d'igname dans les systèmes à base de légumineuses dépendent des conditions de fertilité du sol (matière organique du sol, éléments minéraux, engrais organique), de gestion des cultures (durée d'installation de la culture, hauteur des buttes, intensité d'utilisation de la terre, entretiens des champs) et climatiques (pluviométrie). Le potentiel de production de l'igname dans les systèmes à base des légumineuses dépend alors de leur capacité à restaurer la fertilité des sols par l'accumulation biologique de la matière organique, des éléments minéraux et une gestion proportionnée de la culture (taille des buttes appropriée à la grosseur des semenceaux d'igname, plantation précoce d'igname en octobre-décembre pour faciliter l'amorce de l'autotrophie dès les premières pluies, 2 à 4 sarclages...) y compris un bon niveau et une bonne distribution de la pluviométrie les six premiers mois du cycle de la culture pour une meilleure performance des tubercules.

Profitabilité économique des systèmes de cultures à base d'igname intégrant les légumineuses

Les valeurs actualisées nettes (VAN) dans les systèmes de rotation à base d'igname intégrant les légumineuses herbacées (*Mucuna/maïs*, *Aeschynomene/maïs*, *Aeschynomene/maïs/sorgho*) ou arbustives (*Gliricidia/Aeschynomene/maïs*) en comparaison avec les systèmes traditionnels (précédents maïs, maïs/sorgho, *Andropogon* ou défriche forestière sur brûlis) ont été estimées avec un horizon temporel de 4 ans selon divers taux d'actualisation (0% - 50%). Les taux d'actualisation reflètent l'alternative des investissements

intéressants et la préférence des divers exploitants pour des investissements plutôt qu'un revenu immédiat.

Aux différents taux d'actualisation, les rotations à base d'igname intégrant les légumineuses herbacées ou arbustives (*Gliricidia*) ont des valeurs ajoutées nettes (VAN) et productivités de la terre plus élevées que les systèmes traditionnels (Chapitre 2.3 et Partie 3). Néanmoins, ces systèmes demandent beaucoup plus de main d'œuvre (222 à 262 homme-jours ha⁻¹) que les systèmes traditionnels (102 à 196 homme-jours ha⁻¹) mais induisent une productivité de la main d'œuvre plus élevée à l'exception du système agroforestier. En effet, la productivité du travail sous le système agroforestier est plus élevée que celle obtenue dans les systèmes sous les légumineuses herbacée mais inférieure à la productivité du travail dans le système de défriche forestière sur brûlis. Bien que les producteurs aient déjà adapté le système agroforestier à base de *Gliricidia* pour réduire les temps de travaux additionnels en remplaçant l'émondage par un brûlis précoce, ceci peut constituer un facteur limitant l'adoption puisque les producteurs ne vont pas tous anticiper une amélioration plus que proportionnelle du produit et des recettes générés.

Ces résultats confirment les travaux antérieurs de Bamire et Manyong (2003) et de Olarindé (2006), établissant la rentabilité des systèmes d'intensification à base des légumineuses. Ces résultats sont en concordance avec les travaux d'Adjei-Nsiah *et al.* (2007) qui ont indiqué un revenu net et un ratio bénéfice-coût plus élevé (62 %) dans les systèmes de cultures maïs/*Mucuna*/maïs au Ghana. En outre, les travaux antérieurs ont révélé la rentabilité des technologies d'intensification avec un effet positif sur les revenus des ménages ruraux. Les revenus agricoles annuels observés sont plus élevés dans les systèmes répétitifs avec les légumineuses de couverture (RLCC) au sud-ouest du Nigéria pour des cultures vivrières, principalement l'igname et le manioc (Olarindé, 2006). L'utilisation répétée des légumineuses de couverture a contribué également à améliorer la fertilité des sols et en limiter la dégradation.

Adoption et contraintes contingentes liées à l'adoption des systèmes de cultures à base d'igname intégrant les légumineuses

Les analyses ont porté ici sur les niveaux et facteurs de l'adoption ainsi que les contraintes à l'adoption des systèmes de culture à base d'igname intégrant les jachères plantées de légumineuses. Dans ce cadre, nous avons utilisé deux méthodes pour l'analyse: (1) évaluation de l'adoption des systèmes intégrant les légumineuses en utilisant la fonction

multinomiale; (2) évaluation des contraintes à l'adoption des systèmes intégrant les légumineuses sur la base des scores.

Les légumineuses ont été introduites dans la zone d'étude en 1990. L'adoption est confirmée lorsque la jachère intégrant une légumineuse (adaptée ou non par l'agriculteur) est répliquée/étendue spontanément (sans l'appui de la recherche) sur une parcelle de bonnes dimensions (au moins 350 m²) pour une culture subséquente (igname).

Les légumineuses dans les systèmes de cultures à base d'igname proposées aux petits exploitants sont appréciées pour leur capacité à restaurer la fertilité des sols, à maintenir l'humidité du sol et à contrôler les adventices (*Imperata cylindrica* en particulier) dans la région centrale du Bénin. En outre, elles augmentent le rendement de l'igname, le revenu des petits exploitants et contribuent à compléter l'alimentation des petits ruminants. Ces observations des petits exploitants confirment les résultats de recherche (Tarawali *et al.*, 1993; Versteeg *et al.*, 1998; Carsky *et al.*, 1998; Azontondé *et al.*, 1998; Carsky *et al.*, 1999 ; Olarindé, 2006). *Mucuna* comparé à *Aeschynomene* contribue plus à l'amélioration des macroéléments du sol (N, P, K) en les rendant plus disponibles à la culture subséquente (Chapitre 2.2.).

Les travaux d'étude conduite dans 306 ménages agricoles utilisant le modèle multinomial ont permis de mettre en évidence les facteurs de l'adoption des systèmes de culture à base d'igname intégrant les légumineuses (Maliki, 2006). La pression foncière (19% de l'effectif), le genre et le choix foncier (25%), l'accès au crédit (5%) et la proximité de la recherche développement (31%) sont les facteurs discriminants d'adoption.

Les résultats de nos travaux ont révélé que l'adoption est plus significative dans la zone à pression démographique relativement élevée (Maliki, 2006). Plusieurs travaux de recherche ont montré l'influence de la pression foncière sur l'adoption des systèmes améliorés (Dongmo, 1978; Snrech, 1995). Mais des résultats contrastés sont révélés avec l'agroforesterie (Adesina *et al.*, 2000). En effet, dans un contexte de pression foncière où les terres cultivables sont peu disponibles, les producteurs se montrent peu favorables à l'agroforesterie et pour cause, les espaces pour les cultures vivrières sont réduits.

L'analyse selon le genre sur l'adoption des technologies dans la région centre du Bénin a révélé que les femmes ayant un statut foncier défavorable manifestent plus d'intérêt pour les légumineuses herbacées que les hommes. *Mucuna* est plus apprécié et adopté que *Aeschynomene* (Maliki, 2006). En effet, 48% (26/54) et 24% (13/54) de femmes ont adopté les rotations intégrant *Mucuna* et *Aeschynomene* respectivement tandis que 31% (77/252) et 21% (54/252) des mêmes rotations ont été adoptées par les hommes. Seulement 11% (33/306)

des hommes ont adopté le système à base de *Gliricidia* et le taux d'adoption par les femmes est quasi nul (1/306) (Maliki, 2006). Ces faibles taux d'adoption, en particulier pour le système à base de *Gliricidia*, se justifieraient par une productivité du travail plus élevée que le système traditionnel de jachère forestière sur brûlis. Les résultats d'étude ont révélé que les hommes sont plus enclins à l'adoption de l'agroforesterie au Cameroun que les femmes (Adesina *et al.*, 2000). Les auteurs ont révélé que les systèmes d'agriculture durable orientés vers les femmes doivent être compatibles à leur mode de tenure foncière et sylvicole. Lorsque le statut foncier des femmes est défavorable, les technologies nécessitant l'occupation des terres par les arbres pendant une longue période ne sont pas souvent adoptées par les femmes. Dans ce cas, les jachères améliorées de courte durée sont plus appropriées pour les femmes. Ceci est en adéquation avec les résultats de nos études.

Les résultats de nos travaux ont montré l'importance du crédit formel à l'adoption des systèmes de culture à base d'igname intégrant les légumineuses (Maliki, 2006). Ceci est en conformité avec les travaux de certains auteurs dont (Besley and Case, 1993 ; Zeller, 1994 ; Foster and Rosenzweig, 1995; Cary *et al.*, 2002; Byron *et al.*, 2004) qui ont rapporté que les contraintes financières pour l'acquisition des intrants agricoles (équipements, engrais minéraux, semences...) constituent une barrière importante à l'adoption des pratiques améliorées de gestion durable des terres. Mais néanmoins, quelques études ont rapporté que les ressources financières peuvent ne pas être un facteur limitant l'adoption des pratiques améliorées. Par exemple, Rendell *et al.* (1996) ont suggéré que là où le revenu des ménages ruraux dépasse \$50.000 par an, les contraintes financières ne constituent pas un handicap pour entreprendre les systèmes améliorés de production.

L'adoption des technologies est significative sur les sites de Recherche et Développement où les systèmes améliorés ont été expérimentés (Maliki, 2006). Plusieurs travaux de recherches ont révélé également l'importance du contact entre les producteurs et les agents extérieurs dans les premières phases d'expérimentation d'une technologie. Atta-Krah et Francis (1987) et Versteeg et Koudokpon (1993) ont rapporté que les contacts entre les producteurs et la recherche sont particulièrement utiles dans la conduite des expérimentations, où les taux d'abandon des technologies sont habituellement plus élevés. Pannell *et al.* (2006) ont indiqué que la probabilité pour un utilisateur final des produits de la recherche à prendre une bonne décision augmente dans le temps avec l'accroissement de la connaissance, et peut-être l'expérience avec, la pratique ou la technologie. Ils ont signalé, en outre, que les utilisateurs finaux à travers une séquence typique d'acquisition et d'application de nouvelles connaissances, commencent par se rendre compte de l'utilité d'une technologie

ou d'une innovation; ce qui augmente leur aptitude à adopter. Si la phase d'essais est couronnée de succès, surviennent les phases d'extension, d'adaptations, d'adoption ou même d'abandon de l'innovation.

Quant aux contraintes à l'adoption, elles sont d'ordre technique, agro-alimentaire, institutionnel et organisationnel. Sur le plan technique, la difficulté d'incorporation de la biomasse dans le sol a été exprimée aussi bien par les femmes que par les hommes pour *Mucuna* et *Aeschynomene* avec un degré de sévérité plus élevé aussi bien au niveau des entretiens individuels (306 ménages agricoles) que de groupe. Cela démontre l'acuité de cette contrainte dans les systèmes de culture à base d'igname intégrant les légumineuses herbacées. Quant au système agroforestier à base d'igname intégrant le *Gliricidia sepium*, la pratique du feu précoce au pied des arbres supprime la charge de travail liée à la coupe des arbustes. Par contre, chez les producteurs n'optant pas pour le feu précoce au pied des arbustes mais pratiquant les coupes fréquentes ou une seule coupe au ras des arbustes dans le dispositif agroforestier à écartement lâche (4 m × 4 m), la main d'œuvre liée à l'émondage demeure la principale contrainte (Maliki, 2006).

Sur le plan agro-alimentaire, l'absence de valeur d'usage des graines de légumineuses (*Mucuna*) a été exprimée dans les deux zones et confirme les résultats des travaux antérieurs de Deffo *et al.* (2002). En fait, les graines du *Mucuna* contiennent 3 (3,4-dihydroxyphenyl) - L-alanine, connue sous le nom de L-Dopa qui rend difficile sa consommation. La consommation humaine des graines non-traitées peut causer l'intoxication alimentaire, mais les toxines peuvent être éliminées en bouillant, en imbibant les graines et en changeant plusieurs fois l'eau (Kay, 1979). La teneur en L-Dopa du *Mucuna* varie de 4,7 à 6,4% (Versteeg et Koudokpon, 1990). Les paysans accorderaient assurément plus de crédit aux technologies à base d'igname avec *Mucuna*, si en plus de son rôle d'engrais organique fertilisant, les graines étaient comestibles.

Sur le plan institutionnel, les utilisateurs adopteraient assurément des technologies à base d'igname intégrant les légumineuses herbacées s'il y avait un marché pour l'écoulement des graines. Les producteurs assurés de vendre leurs produits en installeraient de plus en plus. L'existence du marché soutient l'adoption des technologies améliorées pour les rendements et revenus plus élevés des ménages ruraux (Boserup, 1970; Braun et Kennedy, 1986). Le fait que les paysans évoquent le caractère non-comestible des graines de *Mucuna* (ou difficulté de l'écoulement) voudrait en fait dire qu'ils attendent des produits (revenus) additionnels des efforts (terre et surtout travail) qu'on leur demande de consacrer à la culture du *Mucuna* et qu'ils n'arrivent pas à recouvrer ces produits (revenus) additionnels. En d'autres termes,

lorsque le paysan calcule le gain net additionnel (produits additionnels moins coûts additionnels) suite à la mise en œuvre des technologies proposées en prenant en compte l'impossibilité pour lui de recouvrer certains produits (revenus), il se rend compte certainement que ce gain net additionnel est négatif. Evidemment, il peut se retenir d'adopter ces technologies dans ces conditions. On peut répliquer que les technologies lui permettent de conserver les sols et donc lui assure une production (ou une source de revenus) durable. Mais il répondra certainement en évoquant la maxime 'un tiens vaut mieux que deux tu l'auras'. Cette maxime est particulièrement valable lorsqu'on est sur un échantillon de pauvres.

Sur le plan organisationnel, la divagation des bœufs a été également soulevée par les producteurs. En effet, le pâturage communal et extensif continue d'être la stratégie prédominante d'alimentation du bétail dans la zone de transition Soudano-guinéenne du Bénin. Cette pratique conduit au manque de fourrage de qualité particulièrement pendant la saison sèche, à l'utilisation des résidus de récolte dans les champs des petits exploitants pour l'affouragement animal. Les dégâts des cultures, le feu de végétation pratiqué par les éleveurs peuls pour favoriser l'émergence du fourrage frais et les piétinements localisés par les bœufs causent des conflits entre agriculteurs et éleveurs (Dugué *et al.*, 1998). Il y a un besoin urgent de remplacer ce cycle destructif par les systèmes d'exploitation agricole économiquement et écologiquement viables et par une gestion consensuelle des espaces agropastoraux.

Eue égard à ces contraintes, l'intensité de l'adoption des technologies (rapport entre superficie couverte par les technologies et la superficie totale de terres arables) dans la région centre du Bénin reste encore faible malgré les premières adaptations par les producteurs/productrices des systèmes de culture à base d'igname intégrant les légumineuses. Les niveaux d'intensité de l'adoption sont 4%, 6% et 1% respectivement pour les rotations à base de *Aeschynomene*, *Mucuna* et *Gliricidia* (Maliki, 2006). Autrement dit, en 2005, sur 100 ha de terres arables dans la région centre du Bénin, seulement 1 ha a été couvert par exemple par la jachère de *Gliricidia sepium*. En effet, nous assistons à l'heure actuelle dans la zone d'étude à la poursuite de la mise en valeur des jachères arborées et, peu à peu, les terroirs villageois seront totalement défrichés, par expansion en auréoles successives et par essaimage (Floquet *et al.*, 2012). Quand les disponibilités forestières décroissent, certains producteurs d'igname abandonnent la production et d'autres se spécialisent et s'adaptent aux changements de conditions du milieu, en particulier grâce à la descente dans les bas-fonds corrélée à des adaptations variétales permettant de cultiver encore des variétés à deux récoltes (Floquet *et al.*, 2012). Ces adaptations, qui sont aussi des formes d'intensification de l'utilisation d'espaces se raréfiant, semblent pour l'instant être préférées à des systèmes sédentarisés,

malgré les performances relatives de l'igname derrière les plantes améliorantes. Les résultats montrent que le paysan prend en compte plutôt le coût d'opportunité de ses ressources en travail pour décider s'il doit les investir ou pas dans les nouvelles technologies. Si par exemple, il se rend compte que le travail additionnel qu'on lui demande d'allouer pour maintenir les systèmes à base d'igname peut produire des gains plus élevés s'il les investit plutôt pour développer un autre système de culture, il n'hésiterait pas à le faire. Ceci est en conformité avec la théorie de Boserup (1965) ou de Mulder (2000). C'est justement la raison pour laquelle les paysans sont réticents à passer des systèmes extensifs aux systèmes intensifs incluant des apports de matières organiques. En effet, Boserup (1965) rapporte que tant que des réserves de terres sont disponibles, les paysans accepteront difficilement de pratiquer des systèmes intensifs 'sédentarisés' avec apports de matières organiques parce qu'ils sont conscients que ceci entraînera une baisse de la productivité de leur principal facteur de production (le travail).

Quelques limites de l'étude

Bilan humique

Plusieurs facteurs peuvent influencer le calcul du bilan humique, particulièrement les coefficients d'humification et de minéralisation de la matière organique ou de l'humus du sol (Soltner, 1994; CRAAQ, 2003). Ces coefficients peuvent varier selon la zone pédoclimatique, les systèmes de culture, l'année, etc. La difficulté d'attribuer des valeurs précises aux coefficients d'humification et de minéralisation de la matière organique incorporée au sol constitue une limite de l'étude. D'où la démarche d'analyse de sensibilité que nous avons proposée.

Non prise en compte de l'effet des distorsions des prix dans le modèle économique proposé

Nous avons appliqué le modèle standard coûts-bénéfices (avec parfois l'application du critère VAN) pour effectuer l'étude de rentabilité de l'intégration des légumineuses. Nous avons déduit que les technologies proposées sont profitables. Pourtant, elles sont peu pratiquées même lorsque les paysans les connaissent parfaitement. Ce genre de résultat amène certains à qualifier les paysans d'irrationnels ou d'ignorants. Bien sûr, dans notre analyse nous avons

évitée cette conclusion en proposant une autre démarche pour mieux comprendre les contraintes à l'adoption des technologies proposées (Chapitre 2.5.).

Le modèle standard coûts-bénéfices (même avec l'utilisation du critère VAN) peut difficilement prendre en compte la distorsion des prix. En effet, le paysan est confronté à de multiples imperfections de marchés (les marchés fonctionnent rarement bien), et par conséquent les prix observés sur les marchés reflètent rarement la valeur des facteurs de production utilisés et des biens produits par le paysan. Ce modèle suppose qu'il y a séparabilité entre le volet 'consommation' et le volet 'production' au sein du ménage agricole. Or s'il y a distorsions des prix, cette hypothèse n'est plus valable. Dans ce cas, on peut recourir aux modèles non séparables pour comprendre les décisions économiques ou pour étudier la rentabilité des options technologiques parmi lesquelles le paysan doit opérer un choix. Cette approche est débattue dans la littérature (De Janvry et Sadoulet, 2006). Néanmoins, l'étude de rentabilité proposée ici est probablement valable. Mais il s'agit de résultats préliminaires qui ne prennent pas en compte l'effet des distorsions des prix qui constituent un phénomène courant dans les pays pauvres.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les résultats de l'étude augurent d'un impact positif en matière de régénération de la fertilité des sols et d'amélioration de rendement d'igname dans les systèmes de production à base d'igname intégrant les légumineuses. Les facteurs principaux du rendement de l'igname sont la production de matière sèche des précédents culturaux, les conditions de fertilité des sols et du climat (pluviométrie). Le bilan net d'azote est positif dans les systèmes de culture à base d'igname intégrant les légumineuses et négatif dans les systèmes traditionnels de production d'igname. Les systèmes à légumineuses améliorent les propriétés physico-chimiques des sols et montrent une productivité de la terre, de la main d'œuvre et du capital supérieure à celles des systèmes traditionnels. Dans les systèmes à légumineuses, la variabilité des rendements d'une part, l'écart entre le rendement obtenu et l'optimum d'autre part sont réduits.

Le potentiel de production de l'igname dans les systèmes à base des légumineuses dépend alors de leur capacité à restaurer la fertilité des sols par l'accumulation biologique de la matière organique, des éléments minéraux et une gestion adéquate de la culture. Cette gestion adéquate des cultures implique la taille des buttes appropriée à la grosseur des semenceaux d'igname, la pratique de 2 à 4 sarclages du champ d'igname, la plantation précoce d'igname en octobre-décembre pour faciliter l'amorce de l'autotrophie dès les premières pluies et la nutrition minérale de la plante. Et ce, à travers un bon niveau et une bonne distribution des précipitations les six premiers mois du cycle de la culture pour une meilleure performance des tubercules. Les rotations intégrant les légumineuses constituent une alternative aux systèmes itinérants de défriche forestière sur brûlis afin de permettre de sédentariser la culture d'igname dans les environnements dégradés et contribuer à la protection des forêts. Elles contribuent également à l'amélioration de la productivité de la terre, de la main d'œuvre et du capital, exception faite du système agroforestier à base du *Gliricidia* plus exigeante en main d'œuvre par rapport au système de défriche forestière sur brûls. La productivité du travail sous le système agroforestier est plus élevée que celle obtenue dans les systèmes sous les légumineuses herbacées mais inférieure à la productivité du travail dans le système de défriche forestière sur brûlis. La diffusion et l'adoption progressive des systèmes sédentarisés intégrant les légumineuses nécessitent une collaboration agissante et efficace entre les structures de recherche, de développement et les producteurs. Ce processus contribuera à la réduction de l'emprise de l'homme sur les forêts en

minimisant les émissions de gaz à effet de serre et au renforcement de la capacité des sols sous forêt à jouer le rôle de puits de carbone.

Toutefois, les contraintes d'ordre technique (difficulté d'incorporation de la biomasse), agro-alimentaire (absence de valeur d'usage des graines de légumineuses), institutionnel (absence de marché pour l'écoulement des graines, difficulté d'accès au crédit) et organisationnel (divagation des bœufs et feux de végétation nocifs) entravent l'adoption des technologies. Sur la base des résultats et des contraintes identifiées, les propositions sont formulées sous forme de recommandations de recherche ou de propositions d'action, ces dernières plutôt destinées au développement. Pour une meilleure articulation de nos propositions, nous les avons scindées en trois groupes à savoir: recherche, organisation d'appui et politique agricole de l'état.

Recherche

Les travaux conduits par Floquet *et al.*, 2012 ont révélé trois catégories de producteurs pour les systèmes de culture à base d'igname dans la zone d'étude: gros producteurs (généralement les nantis conquérant de nouvelles terres pour l'igname), les producteurs moyens (niveau de prospérité moyen développant des systèmes adaptés dans les jachères dégradées) et les petits producteurs (niveau de prospérité faible avec marginalisation de l'igname au profit d'autres cultures ou activités notamment l'élevage). Il s'avère nécessaire de poursuivre les activités de recherche avec différentes catégories de producteurs selon leur statut respectif (main d'œuvre, capital financier, qualité du sol, élevage) en mettant particulièrement l'accent sur les points suivants:

- suivi des adaptations des jachères plantées par les paysans;
- suivi récurrent des systèmes de cultures sédentarisés à base d'igname intégrant les légumineuses à graines, herbacées, arbustives/essences hors forêt en milieu réel et en station (*Gliricidia sepium*, *Moringa oleifera*, *Jatropha curcas*...) et évaluation des impacts à court, moyen et long termes (effet cumulatif de la biomasse sur le sol et le rendement, capture des arrières effets, analyse de la variabilité);
- analyse de simulation des densités d'arbustes dans les dispositifs agroforestiers à base de *Gliricidia sepium* pour la production d'igname;
- suivi des dispositifs de bordure à base de *Gliricidia sepium* intégrant les rotations légumineuses herbacées-igname pour le tuteurage et la réduction de la charge de la main d'œuvre;

- suivi d'essais de fertilisation organo-minérale : rotation *Mucuna*/maïs-igname, *Andropogon*-igname avec application de doses raisonnées d'engrais (P, K) sur l'igname ('timing' de plantation et d'apport d'engrais minéral, âge de la jachère d'*Andropogon*) ;
- développement des technologies pour la valorisation des graines de *Mucuna*;
- développement des systèmes agrosylvopastoraux à base d'igname (embocagement + parage mobile des bovins sur les parcelles fourragères dans une dynamique d'assolement rotation) ;
- suivi du potentiel de production d'igname dans les parcelles d'anacardiers éclaircies;
- développement de la mécanisation adaptée à l'enfouissement de la biomasse dans les buttes/billons
- développement du système de semis direct sous couverture végétale (SCV) après fauchage ou broyage de la biomasse;
- suivi de l'adoption des technologies.

La poursuite des activités de Recherche-Développement sur les systèmes améliorés à base d'igname intégrant les légumineuses nécessite un partenariat 'optimal' qui serait basé sur :

- la création de "réseaux igname" avec les équipes « Nord-Sud », « Sud-Sud » et/ou « Sud-Nord-Sud » pour les formations universitaires;
- le renforcement des capacités à différents niveaux: niveau individus (producteurs/productrices, vulgarisateurs et autres utilisateurs).

Organisation d'appui

Gestion des conflits agropastoraux

Une approche de gestion des conflits agropastoraux basée sur l'organisation des fora de discussions entre agriculteurs-éleveurs et autres utilisateurs de ressources conduisant à la mise en place des comités de prévention des conflits agropastoraux, l'aménagement des espaces agropastoraux (couloirs et aires de pâturage), l'élaboration d'un code de bonne conduite, la mise en place de certaines essences agroforestières (*Jatropha curcas*, *Moringa oleifera*, *Ziziphus mauritiana*...) autour des champs a été développée dans le cadre des activités de Recherche-Développement dans la région des Collines (Maliki, 2002; Maliki et al., 2002b). Cette initiative mérite d'être poursuivie dans une dynamique d'intercommunalité avec l'implication effective des instances au niveau communal et autres acteurs intervenant

dans le domaine. Ceci dans le but de prendre en compte la diversité des conflits agropastoraux dans le terroir. Cette démarche s'impose du fait que les couloirs de passage et les pâturages sont ouverts à plusieurs villages voire plusieurs communes.

Sécurité foncière

L'élaboration d'un contrat foncier particulièrement entre propriétaires terriens et locataires :

La sécurité foncière est un élément de stabilisation et de pérennisation des options de gestion des ressources naturelles à court, moyen et long terme. Il est donc utile d'initier «un contrat foncier» assurant la sécurité des modes de tenure de terre et la pérennité des droits correspondants. Ledit contrat s'articulera autour des termes suivants (Dufumier, 1996) :

- formulation de nouveaux accords pour le profit du plus grand nombre de producteurs dans le cadre de l'amélioration foncière;
- autonomie de décision et de gestion aux collectivités locales pour la redéfinition des modalités de mise en valeur des terres le plus démocratiquement possible;
- prise en compte de la présence des organisations paysannes représentative des intérêts de différents groupes sociaux;
- identification des problèmes éventuels tels que le paiement de la rente foncière, le transfert de fertilité, etc.;
- assistance des instances d'arbitrage locales (sages, autorités locales, étoiles sociologiques, etc.), dans le cadre de règlement d'éventuels conflits;
- nouveaux droits et devoirs de chacun reconnus et formalisés de façon à ce que nul n'ait à craindre de perdre les bénéfices à long terme de ses investissements à rentabilité différée (l'implantation des haies vives par exemple);
- toute modification de droit de propriété et d'usage doit faire l'objet d'une très large concertation entre différentes catégories sociales en présence et doit requérir l'adhésion de la très grande majorité;

Pour permettre la pratique et la jouissance des bienfaits de la fertilisation des sols par le locataire, les contrats devront être d'une durée minimum de dix ans (cas particulier des dispositifs agroforestiers).

Crédit-intrant et marché

Au regard de tout ce qui précède, il convient d'envisager la mise en œuvre d'un mécanisme triangulaire de financement pour une meilleure gestion des exploitations agricoles fondé sur le warrantage associant (1) les organisations paysannes (2) les structures décentralisées de crédit et (3) les distributeurs d'intrants. Cette approche garantirait la survie des ménages agricoles en constituant un atout pour l'octroi de crédit intrants, la régulation de la transformation et de la commercialisation des produits agricoles. Le Warrant a fait ses preuves dans la sous région notamment au Burkina Faso. Il est un mécanisme de crédit par lequel un produit agricole consigné fournit lui-même la garantie du financement sollicité et les frais qu'il génère. Une organisation paysanne (warrant collectif) peut souscrire un billet à ordre dont le paiement est garanti par un gage portant sur le produit agricole consigné dans un entrepôt (un magasin de stockage géré par l'organisation paysanne au niveau local). Dans le cas du warrant collectif, la consignation du produit est assurée par le groupe (ici une Organisation Paysanne). Le warrant collectif permet de jouer sur les fluctuations saisonnières des prix agricoles. Il évite aussi de tirer sur les modestes budgets familiaux et crée une demande en intrants groupée, solvable et prévisible qui contribue à une meilleure gestion de la fertilité des sols et une intensification des systèmes de cultures.

Politiques agricoles

En définitive, il apparaît que l'état béninois a un rôle important à jouer; il s'y emploie déjà mais davantage d'efforts restent à fournir. L'état peut mener une politique tarifaire préférentielle à l'égard de tous les acteurs du développement qui s'appliquent au respect de l'environnement (Adégbidi et Biaou, 1995). L'état peut, par exemple, exonérer d'impôt sur le bénéfice les plantations privées et augmenter les taxes sur l'exploitation des bois de chauffe et bois d'œuvre. Il peut aussi réduire les taxes aux exploitations agricoles qui s'emploient à l'utilisation des méthodes biologiques. La politique de crédit devra également venir en appui à la politique tarifaire de l'état, en donnant la priorité aux agriculteurs qui s'engagent dans un système adéquat d'agriculture durable. On pourrait aussi augmenter le taux de douane sur certains produits importés pour subventionner l'agriculture durable.

C'est aussi une nouvelle société qui doit s'organiser, car les nouvelles règles engendrent des incompréhensions et des frustrations: comment abolir le feu de végétation nocif, la divagation en saison sèche, etc., sans créer de graves tensions ni demander un travail parfois

exorbitant, qui ne feraient que précipiter l'exode rural? Tout est lié et les difficultés de la parcelle agricole renvoient à des recherches de solutions autres qu'agricoles; c'est pourquoi les recherches sur les processus, les nouvelles techniques de culture sédentarisée et les pratiques de gestion de la fertilité doivent se poursuivre avec la participation active de différents acteurs du monde rural pour une action synergique entre la recherche, la vulgarisation et les paysans.

Références bibliographiques

Références

- Adanguidi, J., 2001. Réseaux, Marchés et Courtage. La filière igname au Bénin (1990 – 1997), Thèse de Doctorat. Université de Hohenheim, Stuttgart, Allemagne, 230 p.
- Adégbidi, A., 1994. *Cours de gestion des exploitations agricoles*, DESAC/FSA/UAC, 81p.
- Adégbidi A. et Biaou, G., 1995. L'agriculture durable au Bénin: rôle de l'Etat. *In* : A la recherche de l'agriculture durable au Bénin. Instituut voor Sociale Geografie, Universiteit van Amsterdam. - Ill. - (Amsterdamse sociaal-geografische studies, ISSN 0169-6432 ; 49), pp 150-156.
- Adégbola, P. and Vlaar, J., 1998. Expériences des cultures en couloirs et de l'agroforesterie au Sud-Bénin. Compte rendu d'atelier scientifique tenu à Cotonou les 2 et 3 février 1998, INRAB, Cotonou, Bénin.
- Adeleye, E. O., Adeyemi, O. R. and Adediji O. A., 2003. Soil degradation in Nigeria Causes and Remedies. *In* Adekunle, V., Okoko, E. and Adedutun S. (Eds) *Challenges of Environmental Sustainability in a Democratic Government*. Proceedings of the 11th Annual conference of Environment and Behavior Association of Nigeria (EBAN) held at the Federal University of Technology, Akure, Ondo State, Nigeria. 26th – 27th November, 2003. p 78-87.
- Adesina, A.A., D. Mbila, G.B. Nkamleu and D. Endamana, 2000. Econometric analysis of the determinants of adoption of alley farming by farmers in the forest zone of southwest Cameroon. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 80 (2000) 255–265.
- Adjei-Nsiah, S., 2006. Cropping systems, land tenure and social diversity in Wenchi, Ghana: implications for soil fertility management. PhD Thesis. Wageningen University, The Netherlands.
- Adjei-Nsiah, S., Kuyper, T.W., Leeuwis, C., Abekoe, M.K. and Giller, K.E., 2007. Evaluating sustainable and profitable cropping sequences with cassava and four legume crops: Effects on soil fertility and maize yields in the forest/savannah transitional agro-ecological zone of Ghana. *Field Crops Research* 103 (2007) 87–97.
- Agossou, V. et Igué, M., 2002. Caractérisation des sols des sites de recherche développement du CRA-Centre : classification dans la base de référence mondiale et actualisation de leur niveau de dégradation, Atelier scientifique Centre (1ère édition) 18 au 19 Déc.2002 au CRA- Centre, INRAB/MAEP, Savè, Bénin.
- Albrecht, S.L., Bennett, J.M. and Quesenberry, K.H., 1981. Growth and nitrogen fixation of *Aeschynomene* under water stressed conditions. *Plant Soil*. 60:309–315.

- Albrecht, S.L., Bennett, J.M. and Boote, K.J., 1994. Relationship of nitrogenase activity to plant water stress in field grown soyabeans. *Field Crop Research* 8:61–71.
- Amede, T., 2003. Opportunities and Challenges in Reversing Land degradation: The Regional Experience. In: Amede, T (ed), Natural resource degradation and environmental concerns in the Amhara National Regional State: Impact on Food Security. Ethiopian Soils Sci. Soc. pp. 173-183.
- Areola, O., Aweto, A.O. and Gbadegesin, A.S., 1982. «Organic matter and soil fertility restoration in forest and savanna fallows in South Western Nigeria », *Geojournal*, vol. VI, n°2: pp. 183-192.
- Arodokoun, D., A.M. Matthes, B. Agbo, P. Akondé, M. Adomou, H. Hodonou, G. Agbahungba and J. Sagbohan, 2004. Manuel du cycle de gestion de la recherche agricole au Bénin. MAEP, Cotonou, 103 p
- Assogba, F., 1996. : Effet d'un système maïs/légumineuse (*Mucuna pruriens* var *utilis*) sur la matière organique d'un sol ferrallitique (terre de barre au Sud du Bénin, INRAB, Cotonou, Bénin.
- Atta-Krah, A.N. and Francis, P.A., 1987. The role of on-farm trials in the evaluation of composite technologies: the case of alley farming in southern Nigeria. *Agric. Syst.* 23, 133–152.
- Atta-Krah, A. and Sumberg, J.E., 1998. Studies with *Gliricidia sepium* for crop/livestock production systems in West Africa. *Agroforestry systems* 6: 97-118.
- Azéhou-Pazou, J., 2005. Bilan des connaissances sur l'igname (*Dioscorea* spp.) au Bénin: acquis et perspectives. Rapport d'activités, FAO/TCP/BEN/3002 (A), INRAB/MAEP, Savè, Bénin, 59 p.
- Azontonde, A.H., 1993. Dégradation et restauration des terres de barre (sols ferrallitiques faiblement désaturés argilo-sableux) au Bénin. La gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES), cah. Orstom, Ser. Pedol. 28(2): 217-226.
- Azontonde, A.H., Feller, R., Ganry, F. et Remy, J.C., 1998. Le *Mucuna* et la restauration des propriétés d'un sol ferrallitique au sud du Bénin. *Agri. et Dév.* (18): 55-62.
- Bamire, A.S. and Manyong, V.M., 2000. Intensification technologies and farm income levels among smallholder farmers in the forest-savanna transition zone of Nigeria. Project 14: *Impact, policy and systems analysis, annual report, International Institute of Tropical Agriculture (IITA)*, Ibadan, Nigeria pp 12-17

- Bamire, A.S. and Manyong, V.M., 2003. Profitability of intensification technologies among smallholder maize farmers in the forest-savanna transition zone of Nigeria. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 100(2-3): 111-118
- Beale, A.J., Calderon, G., Cortes, J. and Rojas, C.E., 1988. Studies on the critical periods of weed competition in yams (*Dioscorea rotundata* Poir, and *Dioscorea alata*). In 7th symposium ISTRC, Gosier, Guadeloupe, 1-6 July 1985. Inra, Paris, France, p. 269-284.
- Becker, M. and Johnson, D.E., 1998. Legumes as dry season fallow in upland rice based systems of West Africa. *Biol. Fertil. Soils* 27, 358–367.
- Becker, M., D. E. Johnson, and Z. J. Segda. 1999. The role of legume fallows in intensified unland rice-based systems of West Africa. In *Cover crops in West Africa. contributing to sustainable agriculture*, eds. D. Buckles, A. Etèka, O. Osiname, M. Galiba, and G. Galiano, International Development Research Centre, International Institute of Tropical Agriculture, Sasakawa Global 2000, Benin, pp 85–108.
- Becker, M., Ladha, J.K. and Ali, M., 1995. Green manure technology: potential usage, limitations. A case study for lowland rice. *Plant and Soil*, 174, 181–194.
- Beedy, T.L., Snapp, S.S., Akinnifesi, F.K. and Sileshi, G.W., 2010. Impact of *Gliricidia sepium* intercropping on soil organic matter fractions in a maize-based cropping system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 138: 3-4; DOI: [10.1016/j.agee.2010.04.008](https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.04.008)
- Bell, A., Mück, O. et Schuler, B., 2000. Les richesses du sol. Les plantes à racines et tubercules en Afrique : une contribution au développement des technologies de récolte et d'après-récolte. Deutsche Stiftung für internationale Entwicklung (DES) et, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ). Berlin, Allemagne, pp : 81-112.
- Bernard, M., Padonou, E., Maliki, R., 1998. La restauration de la fertilité des sols par deux systèmes agroforestiers au Sud Bénin pp. 287-291 in soil fertility management in west Africa land use systems G. Renard, A.: Neef, K. Becker and M. Von oppen (Editors); Niamey Niger, 4-8 March 1997.
- Berthaud, J., Bricas, N. et Marchand, J-L., 1997. L'igname, plante séculaire et culture d'avenir – In : Acte de séminaire international : l'igname, plante séculaire et culture d'avenir – Cired-Inra-Orstom-Coraf, 3-6 juin 1997, Montpellier, France, pp 213-222.
- Besley, T. and Case, A., 1993. Modeling technology adoption in developing countries. *American Economic Review* 83 (May), 396–402.
- Biaou, G., 1995. Influence de la tenure foncière sur les possibilités d'instaurer un système d'agriculture durable au Bénin. In : A la recherche de l'agriculture durable

- au Bénin. Instituut voor Sociale Geografie, Universiteit van Amsterdam. - III. - (Amsterdamse sociaal-geografische studies, ISSN 0169-6432 ; 49), pp 150-156.
- Bolinder, M.A. 2003. Contribution aux connaissances de la dynamique du C dans les systèmes SOL- PLANTE de l'Est du Canada. Thèse de doctorat. Université Laval.
- Boserup, E., 1970. Land use systems evolution and démographic pressure; Eds Flammarion, Paris.
- Braun, V.E. and J. Kennedy, 1986. Commercialization of subsistence agriculture: Income and nutritional effects in developing countries, In Binswanger H.P. and V.J. Braun.
- Bray, R.H., 1954. A nutrient mobility concept of soil plant relationships. *Soils Science*. 78: 9-22.
- Broadhead, J., 2000. Ecophysiology of indigenous trees in agroforestry systems in the semi-arid tropics. PhD thesis, University of Nottingham , UK.
- Brockwell, J., Bottomley, P.J. and Thies, J.E., 1995. Manipulation of rhizobia microflora for improving legume productivity and soil fertility: a critical assessment. *Plant Soil*. 174:143–180.
- Budelman, A. 1989. Effect of the application of the leaf mulch of *Gliricidia sepium* on early development, leaf nutrient contents and tuber yield of water yam (*Dioscorea alata*). *Agroforestry Systems* 8: 243-256.
- Budelman, A. 1990. Woody legumes as live support systems in yam cultivation II. The Yam-*Gliricidia sepium* association. *Agroforestry Systems* 10: 61-69.
- Byron, I., Curtis, A. and J. MacKay, 2004. Providing social data to underpin catchment planning in the Queensland Murray-Darling region, Bureau of Rural Sciences, Canberra.
- Carsky, R. J., S. A. Tarawali, M. Becker, D. Chicoye, G. Tian, and N. Sanginga. 1998. *Mucuna*: a herbaceous cover legume with potential for multiple use. International Institute of Tropical Agriculture, Ibadan, Nigeria. *Resource and Crop Management Division (RCMD). Research Monographs N° 25*.
- Carsky, R.J., Oyewole, B. and Tian, G., 1999. Integrated soil management for the Savana zone of W. Africa: Legume rotation and fertilizer N. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 55: 95-105.
- Carsky, R.J., Becker, M. and Hauser, S., 2001. *Mucuna* cover crop fallow systems: Potential and limitations. Pages 111-135 in *Sustaining Soil Fertility in West Africa* (Tian G,

- Ishida F and Keatinge JDH, eds.). SSSA Special Publication No. 58, Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, USA.
- Carsky, R.J., Wolo, N., Manyong, V. M. and Tian, G., 2001. Understanding soil factors limiting the potential yield of yam (*Dioscorea spp.*). In *Proceedings of the 7th Triennial Symposium of the International Society for Tropical Root Crops-Africa Branch (ISTR-CAB)*, Ibadan, Nigeria, eds. M. O. Akoroda and J.M. Ngeve, International Institute of Tropical Agriculture, 460 198–209.
- Cary, J., Webb, T. and Barr, N., 2002. Understanding land managers' capacity to change to sustainable practices: insights about practice adoption and social capacity for change, Bureau of Rural Sciences, Canberra.
- Chadefaud, M. et Emberger, L. 1960. Les végétaux vasculaires in *Traité de botanique*. (ed) Masson et Cie. pp. 1116-1153.
- Chen, W.P., Li, P.H. and Chen, T.H.H., 2000. Glycinebetaine increases chilling tolerance and reduces chilling-induced lipid peroxidation in *Zea mays* L. *Plant Cell Environ* 23, 609 - 618.
- Chikoye, D. and Ekeleme, F.L., 2001. Growth characteristics of ten *Mucuna* accessions and their effects on the dry matter of *Imperata cylindrica* (L.) Rauesch. *Biological Agriculture and Horticulture* 18:191-201.
- Chikoye, D., Manyong, V.M., Carsky, R.J., Ekeleme, F., Gbehounou, G. and Ahanchede, A. 2002. Response of speargrass (*Imperata cylindrica*) to cover crops integrated with handweeding and chemical control in maize and cassava. *Crop Protection* 21:145-156.
- Chotte, J.-L., Duponnois, R., Adiko A. and Cadet, P., 2001. «Jachère et biologie du sol», In Floret & Pontanier (éd., 2001): vol. II, pp. 85-121.
- Cohen, J., Cohen, P., West, S.G. and Aiken, L.S., 2003. *Applied Multiple Regression/Correlation Analysis for Behavioural Sciences*. Lawrence Erlbaum Associates, New York.
- Conservation International, 2007. Biodiversity Hotspots, Guinean Forests of West Africa, Human impacts. [On-line]. [2011-05-15]. < URL: www.biodiversityhotspots.org/xp/hotspots/west_africa/Pages/impacts.aspx >
- Cornet, D., Amadji, F., Dossou, R., Maliki, R. et Vernier, P., 2005. Intérêts des légumineuses herbacées pour une production durable d'igname en Afrique de l'Ouest, in Ozier-Lafontaine, H., Ed., *Proceedings of the 41th international meeting of the CFCS*, Le Gosier, Guadeloupe.

- Cornet, D., Amadji, F., Adjé, I.A., Maliki, R., Adiba, C., Douwirou, D., Vernier, P. et Coulibaly, O., 2009. Production durable d'igname dans un système de culture de semis direct sur couverture végétale (SCV) de *Pueraria*. ISBN : 978-99919-328-2-8. INRAB/MAEP, CIRAD, FAO, Coopération française, IITA, Cotonou, Bénin, 53 p.
- Cornet, D., Vernier, P., Amadji, F. and Asiedu, R., 2006. Integration of yam in cover crop-based cropping system: constraints and potential. Paper presented at the roots and tubers for sustainable development: issues and strategies. *Proceeding of the 14th triennial symposium of the International Society for Tropical Root Crops (ISTRC)*. Central Tuber Crops Research Institute, Thiruvananthapuram, Kerala, India.
- Coyne, D., Tchabi, A., Baimey, H., Labuschagne, N. and Rotifa, I., 2006. Distribution and prevalence of nematodes (*Scutellonema bradys* and *Meloidogyne* spp.) on marketed yam (*Dioscorea* spp.). *Field Crops Research* 96, 142-150.
- CRAAQ., 2003. Guide de référence en fertilisation 2000. 1ère édition. Chapitre 2. p. 20- 29.
- Cresson, P., 1991. Sustainable agriculture in North America: issues and challenges. *Canadian Journal of Agricultural Economics*, Vol. 39, No. 4, Part I, décembre 1991.
- Crews, T.E. and Peoples, M.B., 2004. Legume versus fertiliser sources of nitrogen: ecological trade-offs and human needs. *Agric. Ecosyst. Environ.* 102, 279– 297.
- Cimmyt, 1993. The adoption of Agricultural Technology. A guide for survey design. DF: CIMMYT, Mexico.
- Dansi, A., Vernier, P., Marchand, J-L., Lutaladio, N. and Baudouin, W., 2003. Yam cultivated varieties: farmers' practice knowledges. Biodiversity Working Group of the Food and Agriculture Organization, Benin, 37 p.
- Deffo, V., Hounzangbe-Adote, S., Maliki, R., Ould Ferroukh, H.H.M., Torquebiau, E. et Van Reuler, H., 2002. Options d'intensification durable des cultures vivrières au sud du Togo *African crop science journal*, 10 (3) : 239-249.
- Deffo, V., S. Hounzangbe-Adote, Maliki, R., Ould Ferroukh, H.H.M. et Torquebiau, E., 2004. Contraintes contingentes à l'adoption d'une technologie. Evaluation contingente des contraintes à la fertilisation des sols par le système maïs-mucuna-engrais minéraux au sud du Togo. *Tropicultura*, 22 (1): 19-25.
- Degras, L., 1986. The yam: A Tropical Root Crop. Ed. Maisonneuve and Larose, Coll. Agricultural technic and tropical production, Paris, France, 408 p.
- Degras, L., 1993. The yam: A tropical root crop. MacMillan Press, London, UK:

- Degras, L.; Arnolin, R.; Poitout, A. et Suard, C. 1977. Quelques aspects de la biologie des ignames (*Dioscorea spp.*) I. Les ignames et leurs cultures. *Annales de l'amélioration des plantes* 27 (1): 1-23.
- De Groot, J.P., 1992. *Landbouw en milieu in ontwikkelingslanden. Tijdschrift voor Sociaal-Wetenschappelijk Onderzoek van de Landbouw (TSL)*, Vol. 7, No. 2, pp. 113-132. DE GROOT, W.T. (1992), *Environmental science theory; concepts and methods in a one-world, problem-oriented paradigm*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- De Haan, L.J., 1992. *Rapports entre agriculteurs et éleveurs au Nord-Bénin: écologie et interdépendance transformée*. Commission des Communautés Européennes / Université d'Amsterdam / Université Nationale du Bénin. Tome I (Rapport Principal); Tome II (Annexes). Amsterdam, Pays-Bas.
- De Janvry, A. and Sadoulet, E., 2006. Progress in the Modeling of Rural Households' Behavior under Market Failures. In: De Janvry, A. and Kanbur R. (eds): *Poverty, Inequality and Development. Essays in Honor of Erik Thorbecke*. Kluwer Publishing.
- Dembowski, H., 2012. Natural resources. Development and Cooperation/ Entwicklung und Zusammenarbeit, D+C Vol. 39, pp. 222-263, Germany
- De Rouw, A., 1995. The fallow period as a weed-break in shifting cultivation (tropical forests). *Agric. Ecosyst. Environ.* 54: 31–43.
- Dewis, J. et Freitas, F. 1984. Méthodes d'analyse physiques et chimiques des sols et des eaux. Rome, FAO, Bulletin pédologique n° 10.
- Diby, L.N., Carsky, R., Assa, A., Tra, T.B., Girardin, O., & Frossard, E., 2004. Understanding soil factors limiting the potential yield of yam (*Dioscorea spp.*). In *Proceedings of the 4th International Crop Science Congress, Brisbane Australia 26 September-1 October 2004*, http://www.cropscience.org.au/icsc2004/poster/2/3/322_dibyl.htm.
- Diby, L.N., Hgaza, V.K., Tie, T.B., ASSA, A., Carsky, R., Girardin, O. and Emmanuel Frossard, E. (2009), 'Productivity of yams (*Dioscorea spp.*) as affected by soil fertility' *Journal of Animal & Plant Sciences*, 5 (2), pp 494-506.
- Domerques, Y. et Mangnenot, F., 1970. *Ecologie microbienne du sol*. Masson, Paris, 796 p.
- Dongmo, 1978. Farm land space use and development in tropical Africa : farmers' perception and technical rationality, Ouagadougou workshop 4–8 December 1978, Orstom.
- Doppler, W., Floquet, A., Bierschenk, T., Ahoyo, N., Midingoyi, S., Hinvi, J., 1999. Adoption of Soil Improving and Agroforestry Innovations in Family Farms in Southern Benin. Report of Results. University of Hohenheim, SFB 308, 1999, 64p.

- Dossa, S.C., 1998. Essais d'utilisation des graines de *Mucuna pruriens* var *utilis* et M. P. var *cochichennensis* dans l'alimentation de quelques animaux mono gastriques. Rapp. Tech. De progression de Proj. De Rech. INRAB/URZV, Cotonou, Bénin.
- Doucet, R. 2006. Le climat et les sols agricoles. ed. Berger, Eastman, Québec. xv, 443 pp.
- Doumbia, S., 2005. Revue de la bibliographie sur le thème de la sédentarisation de la culture de l'igname en Afrique de l'Ouest à travers le cas du Bénin' FAO/MAEP/INRAB, Juin 2005, 30 pp
- Dubrouecq, D., 1977. Etude des sols de la région ouest Dassa-zoumè, 96 p. Etude n° 98, CENAP, Bénin.
- Duchaufour, Ph., 1997. Pédogénèse et classification, tome 1. Masson, Paris. 447 p.
- Dufumier, M. 1996. Les projets de développement agricole. Manuel d'expertise. Editions KARTHALA et CTA, 354 p.
- Dugué, P., Gal, P., Lelandais, B., Picardy, J. and Piraux, M., 1998. Methods of integration of agriculture and the breeding and impact on the management of the soil fertility in soudano-sahelian zone In: Fox G, Neef A., Becker K and von Oppen Mr. (Eds.) : Management of the soil fertility in the operating systems of West Africa, pp: 525-530. Proceed. Reg. Workshop, Univ. Hohenheim, ICRISAT and INRAN, Niamey, Niger, 4-8 march 1997, Margraf Verlag.
- Dumont, R., 1997. L'igname dans l'agriculture traditionnelle Ouest-africaine. In : Acte du Séminaire International : l'igname plante séculaire et culture d'avenir. Cirad-Inra-Orstom-Coraf, 3-6 juin 1997, Montpellier, France, pp 71-76.
- Dumont, R. et Vernier, P., 1997. Igname en Afrique : des solutions transférables pour le développement – In *cahier de la recherche développement n° 44, 1997, dossier : racines, tubercules et plantains n° 2 pp 115-120.*
- Dupraz, C., 2008. Arbres et cultures: l'affaire rebondit en Chine. La Revue française des Arbres Ruraux.
- Elias, T.O., 1956. *The nature of African customary law*. Manchester: Manchester University Press.
- Ene, L.S.O. and Okoli, O.O., 1985. Yam Improvement, Genetic Consideration and Problems. In: G. O. (Ed.), *Advances in Yam Research*. Frontline Publishers, Enugu - Nigeria, pp. 18 - 32.
- Etèka, A.C., 1998. Importance des plantes de couverture et de l'agroforesterie dans l'agriculture. Comm. 3è Con Ord. De l'Ass. Des Ressortissants de Diho (ARD-Kassowokpo), 30 août, 5p, Savè, Bénin.

- FAO (Food and Agriculture Organization), 1990. FAO–UNESCO soil map of the world. Revised legend. Soils Bulletin 60. FAO, Rome, Italy. 119 pp.
- FAO, 2002. FAOSTAT, <http://apps.fao.org>
- FAO, 2003. FAOSTAT Agriculture Data, <http://apps.fao/cgi-bin/nph-db.pl?suset=agriculture>. FAO, Rome Italy.
- FAO, 2008. FAOSTAT, <http://apps.fao.org>
- FAO, 2009. FAOSTAT Crop production data. <http://faostat.fao.org>. <http://faostat.fao.org>.
- FAOSTAT, <http://apps.fao.org> (accessed on 13 February, 2009).
- FAOSTAT, 2011. Crop data. [On-line] [2011-05-15] <URL: <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor> >
- Feller, C., 1993. La matière organique du sol, un indicateur potentiel de la durabilité des systèmes de culture dans les zones tropicales semi-arides subhumides d’Afrique de l’Ouest. ORSTOM, Laboratoire d’étude du Comportement des Sols Cultivés (LCSC).
- Feller, C., 1995. La matière organique dans les sols tropicaux à argile: Recherche de compartiments fonctionnels. Une approche granulométrique, Paris, Orstom, 393 p. (coll. T. D.M., vol. 144).
- Fermont, A.M., van Asten, P.J.A., Tittonell, P., van Wijk, M.T., & Giller, K.E., 2009. Closing the cassava yield gap: An analysis from smallholder farms in East Africa. *Field Crops Research*. 112 (2009) 24–36.
- Floquet, A., 2001. Socio-economic evaluation in collaboration with farmers from the bottom of Benin of a range of technologies aiming at stabilizing the soil productivity level’, in Renard G., Neef A., Becker K. and von Oppen M. (Eds.): *Management of soil fertility in the farming systems of West Africa. Proceed. Reg. Workshop. Univ. Hohenheim. ICRISAT and INRAN. Niamey, Niger, 4-8 March 1997. Margraf Verlag, 1998, pp 525-530.*
- Floquet, A., Maliki, R. and Cakpo, Y., 2006. Seven years after the SFB 308 – Adoption Patterns of Agroforestry Systems in Benin. *Contribution au Tropentag, Bonn, 11 au 13 Octobre 2006.*
- Floquet, A., Barbier, B., Maliki, R., Dossouhoui, F. et Siaka, K., 2011. L’igname peut-elle être sédentarisée –étude empirique et prospective grâce à un modèle bioéconomique. Atelier thématique sur « Agronomie et Ecosystèmes » à Antananarivo (Madagascar) du 21 au 26 mars 2011, CORUS & AIRES-Sud, LRI/Université d’Antananarivo.

- Floquet, A.B., Maliki, R., Tossou, R.C., Tokpa, C., 2012. Évolution des systèmes de production de l'igname dans la zone soudano-guinéenne du Bénin. *Cah Agric* 21 : 427-37. doi : 10.1684/agr.2012.0597
- Floret, Ch. et Pontanier, R. (éd.) 2001. *De la jachère naturelle à la jachère améliorée en Afrique tropicale, Le point des connaissances*, vol. II, Actes du séminaire international, Dakar, 13-16 avr. 1999, Paris, John Libbey, 2 vol., vol. II, 356 p.
- Fofana, B., Tame'lokpo, A., Wopereis, M.C.S., Breman, H., Dzotsi, K. and Carsky, R.J., 2005. Nitrogen use efficiency by maize as affected by a *Mucuna* short fallow and P application in the coastal savanna of West Africa. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 71, 227–237.
- Foster, A. and Rosenzweig, M., 1995. Learning By doing and learning from others: human capital and technical change in agriculture. *Journal of Political Economy*.
- Fournier, A., 1994. «Cycle saisonnier et production nette de la matière végétale herbacée en savanes soudaniennes pâturées: Les jachères de la région de Bondoukui (Burkina Faso) », *Écologie*, vol. XXV, n° 3 : pp. 173-188.
- Fournier, J., Serpantié, G., Delhoume, J.P. and Gathelier, R., 2000. «Rôle des jachères sur les écoulements de surface et l'érosion en zone soudanienne du Burkina Faso. Application à l'aménagement », in Floret & Pontanier (éd., 2000-a) : vol. I, pp. 179-188.
- French Ministry of Cooperation, 1993. *Memento de l'agronome*, 1636 p.
- Franzen, H., Lal, R. and Ehlers, W. 1994. Tillage and mulching effects on physical properties of a tropical Alfisol. *Soil and Tillage Research* 28:329-346.
- Frossard, E., 2009. Productivity of yams (*Dioscorea* spp.) as affected by soil fertility. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 5 (2), 494-506.
- Gaiser, T.V. and Shantaram, M.V., 1984. In situ cultivation and incorporation of green manure legumes in coconut (*Cocos nucifera*) based-systems: An approach to improve soil fertility and microbial activity. *Plant and Soil* 80(3): 373-380.
- Gaiser, T., Fadegnon, B., Cretenet, M., & Gaborel, C., 1999. Long-term experience on a tropical Acrisol: Evolution of soil properties and yield. *UFZ-Bericht* 24:153–156.
- Ganry, F., Diem, H.G. and Dommergues, Y.R., 1982. Effect of inoculation with *Glomus mosseae* on nitrogen fixation by field grown soyabeans. *Plant Soil*. 68:321–329.
- Ghosh, S.P., Ramanujam I., Jos J.S., Moorthy S.N., Nair R.G., 1988. *Tuber Crops*. Oxford & IBH publishing CO.PVT.LTD., New Delhi, India.

- Giertz, S., Junge, B. and Diekkrüger, B., 2005. Assessing the effects of land use change on soil physical properties and hydrological processes in a sub-humid tropical environment of West Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30 (8–10), 485–496.
- Giller, K.E., 2001. *Nitrogen Fixation in Tropical Cropping Systems*, 2nd ed. CAB International, Wallingford, UK.
- Gockowsky, J., Tonye, J., Baker, D., Weise, S.F., Tiki-Manga, T., Ndoumbe, M. and Fouagueue, A., 2002. ASB report phase II. March 1999, IITA/IRAD, Yaoundé, Cameroon.
- Greenland, D.J. and Nye, P.H., 1959. «Increase in carbon and nitrogen contents of tropical soils under 'natural fallows'», *Journal of Soil Science*, n° 10: pp. 284-299.
- Hagar, H., Ueda, N. and Shal, S.V., 1996. Role of reactive oxygen metabolites in DNA damage and cell death in chemical hypoxic injury LLC-PK1 cells. *A. Amer. J. Physiol* 271, 209-215.
- Hairah, K., van Noordwijk, M. and Cadish, G. 2010. Agroforestry interactions in rainfed agriculture: can hedgerow intercropping systems sustain crop yield on an ultisol in Lampung (Indonesia) ? *Agrivita* 32/3, 205 – 215.
- Hauser, S. and Nolte, C., 2002. Biomass production and N fixation of five *Mucuna pruriens* varieties and their effect on maize yields in the forest zone of Cameroon. *Journal of Plant*.
- Hauser, S., 2006. Biomass production, nutrient uptake and partitioning in planted *Senna spectabilis*, *Flemingia macrophylla*, and *Dactyladenia barteri* fallow systems over three fallow/cropping cycles on Ultisol. Paper presented at Tropentag, 11–13 October 2006, Bonn, Germany.
- Henao, J. and Baanante, C., 2006. Agricultural production and soil nutrient mining in Africa: Implication for resource conservation and policy development. IFDC Tech. Bull. International Fertilizer Development Center. Muscle Shoals, AL. USA.
- Henin, S., & Dupuis, M. 1945. Essais de bilan de la matière organique du sol . *Annales Agronomique* 15, pp. 17-29.
- Hermant, G., 1977. La matière organique son évolution. Cours de Physique de sol. FSA/UAC, Cotonou
- Herren (éds), 1989. *Une solution durable aux problèmes posés par les déprédateurs des cultures en Afrique*. Institut International d'Agriculture Tropicale, Ibadan, Nigéria, pp. 5-8.

- Herrmann, L., 1996. Staubdeposition auf Böden West Africas. Eigenschaften und Herkunftsgebiete der Staäube und ihr Einfluß auf Böden und Standortseigenschaften. Hohenheimer Bodenk. Hefte 36 Hohenheim University, Stuttgart, Germany 236 p.
- Hiepe, C. and Junge, B., 2003. Soil Erosion in the Aguima Catchment. IMPETUS, Atlas, Benin.
- Hinsinger, P., 1998. How do plant roots acquire mineral nutrients? Chemical processes involved in the rhizosphere. *Advances Agronomy* 64:225-265.
- Houngnandan, P., 1998. Relation symbiotique entre *Mucuna* et *Rhizobium*, département du Mono au Bénin *In:Cover crops in West Africa contributing to Sustainable Agriculture*, Cotonou. Benin. (Eds. Buckles, D., Etèka, A., Osiname, O., Galiba, M., Galiano, G.) .
- Hulugalle, N.R., Lal, R. and Opara-Nadi, O.A. 1985. Effect of tillage system and mulch on soil properties and growth of yam (*Dioscorea rotundata*) and cocoyam (*Xanthosoma sagittifolium*) on an Ultisol. *Journal of Root and Tuber Crops* 1-2:9-22.
- Ibewiro, B., Sanginga, N., Vanlauwe, B. and Merckx, R. 2000. Nitrogen contributions from decomposing cover crop residues to maize in a tropical derived savanna. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 57:131-140.
- Igué, A.M., 2000. The use of the soil database for Land Evaluation Procedures-Case study of Central Benin. PhD thesis. University of Hohenheim, Stuttgart, Germany. 235p ISSN 0942-0754.
- Igué, J., 1974. Le rôle de l'igname dans la civilisation agraire des populations Yoruba.
- Igwilo, N. and Okoli, O.O., 1988. Evaluation of yam cultivars for seed yam production, using the minisett technique *Field Crops Research* 19 (2), 81-89
- Ike, P.C. and Inoni, O.E., 2006. Determinants of yam production and economic efficiency among small-holder farmers in southern Nigeria. *Journal of Central European Agriculture* 7, 337-342.
- Janick J. (1982). *Horticultural Science*. Surjet publications, Kamla Nagar Delhi. India. 608 pp.
- Jiang, M. and Zhang, J., 2001. Effect of abscisic acid on active oxygen species, antioxidative defence system and oxidative damage in leaves of maize seedlings. *Plant Cell Physiol* 42, 265 -1273.
- Jouve, P. et Mercoiret, M.-R., 1987. La Recherche-Développement : une démarche pour mettre les recherches sur les systèmes de production au service du développement rural. *Les cahiers de la Recherche-Développement* 16 : 8-13, Décembre 1987.

- Junge, B., 2004. Die Böden im oberen Ouémé-Einzugsgebiet: Pedogenese, Klassifikation, Nutzung und Degradierung. PhD-Thesis, University of Bonn.
- Kang, B.T. and Mulongoy, K. 1987. *Gliricidia sepium* as a source of green manure in an alley cropping system. In Withington, D., Glover, N. and Brewbaker, J.L. (eds) *Gliricidia sepium* (Jacq.) Walp. Management and Improvement. NFTA Special Publication 87-01. Hawaii, USA: NFTA
- Kang, B.T. and Reynolds, L., 1986. La culture en couloirs dans les tropiques humides et subhumides, Compte rendu d'un atelier international tenu à Ibadan, Nigeria, du 10 au 14 mars 1986, pp 115-116.
- Kay, D., 1979. Food legumes. Tropical Products Institute, London, UK. Crop and Product Digest No. 3. 435 pp.
- Ladha, J.K. and Garrity, D.P., 1994. Green manure production systems for Asian ricelands. International Rice Research Institute, Manila, Philippines. 195 pp.
- Lal, R., 1995. Tillage and mulching effects on maize yield for seventeen consecutive season on a tropical Alfisol. *Journal of Sustainable Agriculture* 5(4):79-93.
- Lamboni, L., 2003. Approche participative et utilisation du modèle QUEFTS pour la gestion de la fertilité des sols du village de Seve-Kpota au Sud du Togo, Memoire d'ingenieur agronome, UL-ESA, Lomé, 117 p
- LARES, 2001. La problématique de l'intercommunauté dans le fonctionnement des communes, 253p, LARES, Cotonou, Bénin
- Laudelout, H., 1990. La jachère forestière sous les tropiques humides, Unité des Eaux et Forêts, Centre de Recherches Forestières de Chimay, Université Catholique de Louvain. Louvain-la-Neuve, Belgique.
- Lorenzetti, F., Mac isaac, S., Armasson, J.T., Awang, D.V.C. et Buckles, D., 1998. The chemistry, toxicology and food potential of velvet bean (*Mucuna*). In: Bucles D., Etèka A., Osiname O., Galiba M M. et Galiano G. (Eds) : *Plantes de couverture en Afrique de l'Ouest, une contribution à l'agriculture durable CRDI-IITA*, Sasakawa 2000, pp 67-84.
- Lugo, W., Lugo, H., A, G., Rafols, N. and Almodovar, C., 1993. Tillage and fertilizer rate effects on yam yields (*Dioscorea alata* L.). *Journal of Agriculture of the University*
- MAEP, 2007. *Annuaire statistique Campagnes agricoles 2001-2007*: Direction de la Programmation et de la Prospective. Service de la statistique. Cotonou, Bénin.
- MAEP, 2011. *Annuaire statistique Campagnes agricoles 1995-2010*: Direction de la Programmation et de la Prospective. Service de la statistique. Cotonou, Bénin.

- Maliki, R., 2006. Sédentarisation de la culture d'igname et gestion durable des ressources naturelles dans la région centre du Bénin : développement participatif, contraintes, adoption et diffusion des technologies. Thèse DEA, Abomey-Calavi, UAC, 2006, 312 p.
- Maliki, R., 2007. Rapport d'activités du deuxième semestre: "Appui à la production durable d'ignames adaptées aux marchés". FAO/TCP/BEN/3002 (A), INRAB/MAEP, Cotonou, Bénin, 20 p.
- Maliki, R., 2002. Causes et solutions potentielles aux conflits agropastoraux à Gbanlin dans les savanes du Centre du Bénin. Communication présentée à l'Atelier Scientifique, Dassa-Zoumè, 18-19 décembre 2002, INRAB/CRA-Centre, Bénin.
- Maliki, R., Amadji, F. et Adjé, I., 2004. Economic profitability of the improved yam-based systems for sustainable agriculture in the centre of the Benin (West Africa) *in* Tropical Root and Tuber Crops: opportunities for Poverty Alleviation and Sustainable Livelihoods in the Developing world. Communication presented at thirteenth triennial Symposium of the International Society for Tropical Root Crops (ISTRC), November 9-14, 2003, Arusha, Tanzania, East Africa
- Maliki, R., Amadji, F. et Adjé, I., 2002a. Identification des conditions d'application du système igname-*Gliricidia sepium* par les producteurs du Centre-Bénin Acte de l'Atelier Scientifique 2, Niaouli 12-13 décembre 2001, page 590-605, INRAB, Bénin
- Maliki, R., Amadji, F. et Adjé, I. 2002b. Gestion participative des espaces agropastoraux : conflits entre agriculteurs et éleveurs au Centre Bénin. Acte de l'Atelier Scientifique 2, Niaouli, 12-13 décembre 2001, INRAB/CRA-Centre, Bénin.
- Maliki, R., Amadji, F., Adjé, I. et Téblékou, K., 2005. Production durable de l'igname de qualité dans un système de cultures à base de *Gliricidia sepium* et *Aeschynomene*. Référentiel technico-économique. ISBN, N°99919-51-85-7. AFD/PADSE/INRAB/MAEP, Cotonou, Bénin, 70 p.
- Maliki, R.; Bernard, M., Padonou, E., 1998. Etude des effets combinés de NPK et trois différents mulch d'origine végétale sur la production du maïs au Sud Bénin pp. 281-286 in soil fertility management in west Africa land use systems G. Renard, A.: Neef, K. Becker and M. Von oppen (Editors); Niamey Niger, 4-8 March 1997.
- Maliki, R., Toukourou, M., Amadji, F. et Adjé, I., 2007a. Référentiel technico-économique sur la production durable de l'igname de qualité dans un système de cultures intégrant l'*Aeschynomene histrix*. ISBN: 978-99919-62-30-6. FAO/TCP/BEN/3002 (A), INRAB/MAEP, Cotonou, Bénin, 52 p.

- Maliki, R., Toukourou, M., Amadji, F. et Adjé, I., 2007b. Référentiel technico-économique sur la production durable de l'igname de qualité dans un système de cultures intégrant le *Mucuna pruriens* var *utilis*. ISBN: 978-99919-62-31-3. FAO/TCP/BEN/3002 (A), INRAB/MAEP, Cotonou, Bénin, 54 pp.
- Maliki, R., Amadji, F., Adjé, I. et Téblékou, K., 2007c. Remugo dunduuje geete der wakkati dudkihe ballaka "*Gliricidia sepium*" he "*Aeschynomene histrix*". Référentiel technico-économique en Peulh; ISBN : 978-99919-62-34-4. FAO/TCP/BEN/3002 (A), INRAB/MAEP, Cotonou, Bénin, 70 p.
- Maliki, R., Amadji, F., Adjé, I. et Téblékou, K., 2007d. Tevi dudo bēna na ganji, Ɖo ayikungban Ɖokpo o ji xwe nabi Ɖe kpo walo atin *Gliricidia sepium* kpoƉo *Aeschynomene histrix* kpan. Référentiel technico-économique en Fon. ISBN : 978-99919-62-32-0. FAO/TCP/BEN/3002 (A), INRAB/MAEP, Cotonou, Bénin, 69 p.
- Maliki, R., Amadji, F., Adjé, I. et Téblékou, K. 2007e. Shishe ishe ishū kpikpe fun igbakpikpe kpelu ilana titun nikpa lilo asoleji bi Amuletashu (*Gliricidia sepium*) ati Agbile (*Aeschynomene histrix*). Référentiel technico-économique en Yoruba. ISBN : 978-99919-62-31-3. FAO/TCP/BEN/3002 (A), INRAB/MAEP, Cotonou, Bénin, 60 p.
- Maliki, R., Amadji, F., Adjé, I. et Téblékou, K., 2007f. Tam gia duribu wò daburu mi bara *Gliricidia sepium* ka *Aeschynomene histrix* duri. Référentiel technico-économique en Bariba. ISBN : 978-99919-62-33-7. FAO/TCP/BEN/3002 (A), INRAB/MAEP, Cotonou, Bénin, 63 p.
- Maliki R., Toukourou M., Sinsin B. and Vernier P. 2012. Productivity of yam-based systems with herbaceous legumes and short fallows in the Guinea-Sudan transition zone of Benin. Nutrient cycling in Agroecosystems. Vol. 92, n°1, p. 9. DOI: 10.1007/s10705-011-9468-7.
- Martin, F.W. 1974. Tropical yams and their potential. Part 3. *Dioscorea alata*. Washington, USDA, Agriculture Handbook Nr. 495, 39 p.
- Mary, B., & Guérif, J. 1994. Intérêts et limites des modèles de prévision de l'évolution des matières organiques et de l'azote dans le sol. Cahiers Agricultures ; 3, pp. 247-57.
- Masse, O., Bodian, A., Cadet, P., Chotte, J.L., Diatta, M., Faye, E.H., Floret, Chr., Kairé, M., Manlay, R., Pontanier, R., Bernhard-Reversat, F., Russel-Smith, A. and Sarr, M., 1998. «Importance de divers groupes fonctionnels sur le fonctionnement de jachères courtes », in Floret (éd., 1998) : pp. 163-202.
- Mensah, C.M., 1989. Le développement agricole viable: un défi pour l'Afrique. Dans: J.S. Yaninek, & H.R. Herren (éds) (1989), Une solution durable aux problèmes posés par les

- déprédateurs des cultures en Afrique. Institut International d'Agriculture Tropicale, Ibadan, Nigéria, pp. 9-19.
- Miège, J. 1952. Contribution à l'étude systématique des *Dioscorea* d'Afrique Occidentale. Thèse de Doctorat ès-Sciences, Paris.
- Mulder, I., 2000. Soil degradation in Benin: Farmers' perceptions and responses. Research Series N° 240, Tinbergen Institute. Vrije Universiteit Amsterdam, 241 pp
- Mulindabigwi, V., 2005. Influence des systèmes agraires sur l'utilisation des terroirs, la séquestration du carbone et la sécurité alimentaire dans le bassin versant de l'Ouémé supérieur au Bénin. Thèse de doctorat, Université de Bonn, 253 p.
- Mutsaers, H.J.W., Adekunle, A.A., Walker, P. and Palada, M.C., 1995. The Maize and Cassava Production System in Southwest Nigeria and the Effect of Improved Technology. On-farm trials in Alabata and Ayepe,. In: Monograph, R.a.C.M.R. (Ed.). International Institute of Tropical Agriculture, Ibadan, Nigeria, p. 50.
- Nandwa, S.M., 2001. Soil organic carbon (SOC) management for sustainable productivity of cropping and agro-forestry systems in Eastern and Southern Africa. Nutrient Cycling in Agroecosystems 61: 143–158.
- Nezomba, N., Tauro, T.P., Mtambanengwe, F. and Mapfumo, P., 2010. Indigenous legume fallows (indifallows) as an alternative soil fertility resource in smallholder maize cropping systems. Field Crops Research 115, 149–157. doi:10.1016/j.fcr.2009.10.015.
- Nkonya, E., Kaizzi, C. and Pender, J., 2005. Determinants of nutrient balances in a maize farming system in eastern Uganda. Agric. Syst 85, 155-182.
- Nweke, F. I., 1991. La valeur économique des plantes à racines et tubercules et des légumineuses et les aspects de coûts et bénéfices de leur promotion. Pages 82 à 101, in : Veelbehr, E. (Edit) : Formation et Dialogue pour la promotion des cultures à racines et tubercules et des légumineuses en Afrique -Afrique de l'Ouest. DES Feldafing, R.F.A., 249 p.
- Nye, P.H. and Greeland, D.J., 1960. *The soil under shifting cultivation*, Commonwealth Bureau of Soils, Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal, 156p.
- Nye, P.H. and Greenland, D.J., 1964. «Changes of the soil after clearing tropical forest», Plant and Soil.: pp. 101-113.
- Nziguheba, G., Palm, C.A., Buresh, R.J., Smithson, P.C. 1998. Soil phosphorus fractions and adsorption as affected by organic and inorganic sources. Plant and Soil 198: 159-168

- Obiagwu, C.J., 1995. Estimated yield and nutrient contributions of legume cover crops intercropped with yam, cassava, and maize in the Benue river basins of Nigeria. *Journal of Plant nutrition* 18(12), 2775-2782.
- Obiagwu, C.J., 1997. Screening process for ideal food and legume cover crops in the tropical ecosystems I. A proposed selection method. *Journal of Sustainable Agriculture* 10 (1), 5- 14. of Puerto Rico 77, 153-159
- Ohwaki, Y. and Hirata, H., 1992. Differences in carboxylic acid exudation among P-starved leguminous crops in relation to carboxylic acid contents in plant tissues and phospholipid level in roots. *Soil Science and Plant Nutrition* 38:235-243
- Olarinde, L. O. 2006. Performance assessment of land enhancing technologies: An Economic analysis for food crop farmers in southwestern Nigeria. Paper presented at Tropentag, 11–13 October 2006, Bonn, Germany.
- Onwueme, I.C. and Haverkort, J.A., 1991. Modelling growth and productivity of yams (*Dioscorea* spp): Prospects and problems. *Agricultural Systems* 36: 351-367.
- Osakwe, I.I. 1998. Performance of sheep grazing *Brachiaria decumbens*, *Panicum maximum*, and *Pennisetum purpurum* in *Gliricidia sepium* alley plots. *Option Méditerranéenne*, series A (74): 365-369.
- Osei-Bonsu, P. and Buckles, D., 1993. Controlling weeds and improving soil fertility through the use of cover crops: experience with *Mucuna* spp. in Benin and Ghana. *West African Farming Systems Research Network Bulletin*, 14, 2–7.
- O'Sullivan, J.N. and Ernest, J., 2008. Yam nutrition and soil fertility management in the Pacific. 143 Canberra: ACIAR.
- O'Sullivan, J.N., 2010. Yam nutrition: nutrition disorder and soil fertility management. Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR), Canberra, Australia, p. 112.
- Palm, C.A., Gachengo, C.N., Delve, R.J., Cadisch, G. and Giller, K.E., 2001. Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems: application of an organic resource database. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 83 (2001) 27–42
- Pannell, D.J., Marshall, G.R., Barr, N., Curtis, A., Vancley F. and Wilkinson, R., 2006. Understanding and promoting adoption of conservation technologies by rural landholders. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 46, 1407– 1424.
- Payne, W.A., Malcolm, C.D., Hossner, L.R., Lascano, R.J., Onken, A.B. and Wendt, C.W., 1992. Soil phosphorus availability and pearl millet water-use efficiency. *Crop Sci.* 32: 1010-1015.

- Pearce, D.W., Markandya, A. and Barbier, E.B. 1989. *Blueprint for a green economy*. London: Earthscan Publications.
- Peoples, M.B. and Craswell, E.T., 1992. Biological nitrogen fixation: investments, expectations and actual contribution to agriculture. *Plant and Soil*, 141, 13–40.
- Peoples, M.B., Herridge, D.F. and Ladha, J.K., 1995. Biological nitrogen fixation: an efficient source of nitrogen for sustainable agricultural production? *Plant and Soil*, 174: 3–28.
- Peoples, M.B., Ladha, J.K., Herridge, D.F., 1995. Enhancing legume N₂ fixation through plant and soil management. *Plant Soil*. 174:83–101
- Pereira, P.A.A. and Bliss, F.A. 1989. Selection of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) for N₂ fixation at different levels of available phosphorus under field and environmentally-controlled conditions. *Plant Soil*. 115:75–82.
- Pezzey, J., 1989. *Sustainable development concepts. An economic analysis*. World Bank Environmental Papers 2. Banque Mondiale, Washington D.C., Etats-Unis.
- Piéri, C., 1989. «Fertilité des terres de savane. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara », Paris, ministère de la Coopération-Cirad-Irat, 444 p.
- Pillot, D., 1987. Recherche développement et farming system research. Concepts, approches et méthodes. Travaux de Recherche Développement, Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques (GRET), Paris.
- Pontanier R. & Roussel R. (1998). «Les indicateurs du système culture-jachère», in Floret (éd., 1998): pp. 203-229.
- Poulain, J., 1982. Entretien humique des sols tropicaux. Bulletin pédo de la FAO N° 47, Rome, P. 51
- Quenum, M., Giroux, M., & Royer, R. 2004. Étude sur le bilan humique des sols dans des systèmes culturels sous prairies et sous cultures commerciales selon les modes de fertilization. *Agrosol* . 15 (2) : 57-71.
- Redecker, D., Vonbereswordtwallrabe, P., Beck, D.P., Werner, D., 1997. Influence of inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi on stable isotopes of nitrogen in *Phaseolus vulgaris*. *Biol Fertil Soils*. 24:344–346.
- Rémy, J.C., & Marin-Lafèche, A. 1996. Station agronomique de l'Aisne, 1976 - L'entretien organique des terres : coût d'une politique de l'humus - Entreprise agricole, I.N.R.A. pp. 63-67.
- Rendell, R., P. O'Callagan and N. Clark, 1996. *Families, Farming & the Future*. Agriculture Victoria, Bendigo.

- Rgph3, 2004. Cahier des villages et quartiers de ville: département des Collines. MPPD/INSAE, Cotonou, Bénin.
- Röling, N., 1988. *Extension science: information system in agricultural development*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Saïdou, A., 2006. Converging strategies by farmers and scientist to improve soil fertility and enhance crop production in Benin. PhD thesis Wageningen University, the Netherlands, 225 pp
- Salako, F.K. and Tian, G., 2003. Management of a degraded Alfisol for crop production in southwestern Nigeria: Effects of fallow, mounding and nitrogen. *Journal of Sustainable Agriculture* 22(2): 3-21.
- Samake', O., Smaling, E.M.A., Kropff, M.J., Stomph, T.J. and Kodio, A., 2006. Effects of cultivation practices on spatial variation of soil fertility and millet yields in the Sahel of Mali. *Agric. Ecosyst. Environ* 109, 335-345.
- Sanginga, N., 2003. Role of biological nitrogen fixation in legume based cropping systems; a case study of West Africa farming systems. *Plant Soil* 252, 25-39.
- Sanginga, N.; Ibewiro, B.; Hougmandan, P.; Vanlauwe, B. and Okogun, J.A., 1996. Evaluation of symbiotic properties and nitrogen contribution of *Mucuna* to maize growth in the derived savannas of West Africa. *Plant and Soil*, 179, 119–129.
- Sanginga, N., Okogun, J., Vanlauwe, B. and Dashiell, K., 2002. The contribution of nitrogen by promiscuous soyabeans to maize based cropping the moist savanna of Nigeria. *Plant and Soil* 241, 223 - 231.
- Sanginga, N. and Woomer, P.L., 2009. Integrated soil fertility management in Africa: Principles, practices and development process. *Tropical Soil Biology and Fertility Institute of the International Centre for Tropical Agriculture*, Nairobi.
- SAS, 1985. SAS User's guide: Statistics, Version 5 edition, North Carolina, U.S.A SAS Institute, Inc. 456 pp
- SAS, 1996. SAS User's Guide: Statistics. SAS Institute, Cary, NC, USA.
- Schmidt-Soltau, K. et Alimi, R.M., 2008. Rapport final du Programme de Conservation et de Gestion des Ressources Naturelle (ProCGRN). DGFRN/GTZ/MEPN, Bénin, 81 P.
- Schnug, E., Heym, J. and Achwan, F., 1996. Establishing critical values for soil and plant analysis by means of the boundary line development system (BOLIDES). *Comm. Soil Science and Plant Animal*. 27, 2739–2748.
- Sébillotte, M., 1978. Itinéraires techniques et évolution de la pensée agronomique. *C. R. Académie d'Agriculture de France* 2 : 906-914.

- Sellstedt, A., Staahl, L., Mattsson, M., Jonsson, K. and Hoegberg, P., 1993. Can the ^{15}N dilution technique be used to study N_2 fixation in tropical tree symbioses as affected by water deficit? *J Exp Bot.* 44:1749–1755.
- Serpantié, G., Douanio, M. and Djimadoun, M., 1999. «Recherches participatives sur la culture d'*Andropogon gayanus* Kunth var. *tridentatus* Hack en zone soudanienne, 1 : Opportunité de cette culture et éléments d'écologie. 2 : Essais participatifs d'installation de peuplements », in *Actes de l'atelier régional, Korhogo, 26-29 mai 1997, Bobo-Dioulasso, Cirdes* : pp. 181-190.
- Serpantié, G., and Ouattara, B. 2001. Fertilité et jachères en Afrique de l'Ouest. In : *La jachère en Afrique tropicale*- Ch. Floret, R. Pontanier John Libbey Eurotext, Paris, pp. 21-83
- Shatar, T.M., McBratney, A.B., 2004. Boundary-line analysis of field-scale yield response to soil properties. *J. Agr. Sci.* 142, 553–560.
- Sheng G, Sagi M, Weining S, Krugman T, B, F.K.T.A. and Nevo, E., 2004. Wild barley eibi1 mutation identifies a gene essential for leaf water conservation. *Planta* 219, 684 - 693.
- Sholes M.C., Swift, M.J., Heal, O.W, Sanchez, P.A, Ingram, J.S.1. and Dalal, R., 1994. «Soil fertility research in response to the demand for sustainability », in *Woomer & Swift* (éd., 1994) : pp. 1-14.
- Sinsin, B. & Kampmann, D. (eds) 2010. Atlas de la biodiversité de l'Afrique de l'Ouest, Tome I : Bénin, Cotonou & Frankfurt, 725 p.
- Smaling, E.M.A., 1993. An agro-ecological framework for integrated nutrient management. PhD Thesis. Wageningen University, The Netherlands, 250 pp.
- Smaling, E.M.A., Fresco, L.O., 1993. A decision-support model for monitoring nutrient balances under agricultural land use (NUTMON). *Geoderma* 60, 235–256.
- Smaling, E.M.A., Stoorvogel, J.J., Windmeijer, P.N., 1993. Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales. II. District scale. *Fert. Res.* 35, 227–235.
- Snapp, S.S., Mafongoya, P.L., & Waddington, S. 1998. Organic matter technologies for integrated nutrient management in smallholder cropping system of southern Africa. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 71: 185-200.
- Snedecor, G.W. and Cox, W.G., 1980. *Statistical Methods*, 7th ed. The Iowa State Univ. Press, USA.
- Snrech, S., 1995. West african agriculture processing, evolution 1960-1990. challenge for future, implications for sahalian countries 39 p.

- Sodjadan, P.K., Toukourou, A.M., Carsky, R.J. et Vernier, P., 2005. Effets des précédentes plantes de couverture sur la production de l'igname en zone de savane au Bénin et au Togo. *African Journal of Root and Tuber crops* 6 (1), 34-40.
- Soltner, D. 1994. Les bases de la production végétale, Tome 1, Le sol. 20e édition. 467 p.
- Sotomayor-Ramirez, D., Gonzalez-Velez, A., Roman-Paoli, E., 2003. Yam (*Dioscorea* spp.) response to fertilization in soils of the semiarid southern coast of Puerto Rico. *Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico* 87, 91-103.
- Srivastava, A., Dagbenonbakin, G.D. and Gaiser, T., 2010. Effect of fertilization on yam (*Dioscorea rotundata*) biomass production. *Journal of Plant Nutrition* 33, 1056 - 1065.
- Srivastava, A., Gaiser, T., 2010. Simulating biomass accumulation and yield of yam (*Dioscorea alata*) in the Upper Ouémé Basin (Benin Republic) - I. Compilation of physiological parameters and calibration at the field scale. *Field Crops Research* 116, 23-29.
- Ssali, H. and Keya, S.O., 1983. The effect of phosphorus on nodulation, growth and dinitrogen fixation by beans. *Biol Agric Hortic.*1:135–144.
- Ssegane, H., 2007. Tools for remotely assessing riparian buffers protecting streams from sediment pollution. Thesis, University of Georgia, 130 p.
- Stern, N., 2006. Short Executive Summary. Stern Review Report on the Economics of Climate Change, pre-publication edition. HM Treasury. http://www.hm-treasury.gov.uk/d/CLOSED_SHORT_executive_summary.pdf. Retrieved 2009-05-20.
- Stiefel, D.L., 1989. L'engagement de l'IITA dans la lutte biologique. Dans: Yaninek, J.S. et H.R.
- Stoorvogel, J.J., Janssen, B.H., van Breemen, N., 1997a. The nutrient budgets of a watershed and its forest ecosystem in the Taï national park in Côte d'Ivoire. *Biogeochemistry* 37, 159– 172.
- Stoorvogel, J.J., Smaling, E.M.A., 1990. Assessment of soil nutrient depletion in sub-Saharan Africa 1983–2000, vol. I. Main Report. The Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research (SC-DLO), Wageningen, The Netherlands, 137 pp.
- Stoorvogel, J.J., van Breemen, N., Janssen, B.H., 1997b. The nutrient input by Harmattan dust to a forest ecosystem in Côte d'Ivoire, Africa. *Biogeochemistry* 37, 145–157.
- Tamélokpo, A., A. Mando & H. Breman, 2007. Influences des éléments manquants et la gestion du sol sur les rendements de maïs et le recouvrement de N, P et K dans des systèmes d'agroforesterie. In: Development and dissemination of sustainable integrated

- soil fertility management practices for smallholder farmers in sub-Saharan Africa. IFAD/TSBF/IFDC. Techn. Bull. IFDC - T71. IFDC, Muscle Shoals, AL (USA).
- Tarawali, G., Manyong, V.M., Carsky, R.J., Vissoh, P.V., Osei-Bonsu, P. and Galiba, M., 1993. Adoption of improved fallows in West Africa: Lessons from *Mucuna* and *Stylo* case studies. *Agroforestry systems* 47: 93-122.
- Tchabi, A., Burger, S., Coyne, D., Hountondji, F., Lawouin, L., Wiemken, A. and Oehl, F., 2009. *Promiscuous arbuscular mycorrhizal symbiosis of yam (Dioscorea spp.)*, a key staple crop in West Africa. *Mycorrhiza* 19(6): 375-392.
- Tittonell, P., Vanlauwe, B., de Ridder, N. and Giller, K.E., 2007. Heterogeneity of crop productivity and resource use efficiency within smallholder Kenyan farms: soil fertility gradients or management intensity gradients? *Agric. Syst.* 94, 376-390.
- Tittonell, P., Shepherd, K.D., Vanlauwe, B. and Giller, K.E., 2008. Unravelling the effects of soil and crop management on maize productivity in smallholder agricultural systems of western Kenya-An application of classification and regression tree analysis. *Agriculture Ecosystem and Environment*. 123 (2008) 137–150.
- Ton, P. and de Haan, L.J., 1995. A la recherche de l'agriculture durable au Bénin. Instituut voor Sociale Geografie, Universiteit van Amsterdam. - Ill. - (Amsterdamse sociaal-geografische studies, ISSN 0169-6432 ; 49), 204 p.
- Toose, W.A., A. Tamélokpo & M.C.S. Wopereis, 2007. Deux techniques agroforestiers, culture en couloir et parc à bois cas de la savane côtière Davié, Togo. In: Development and dissemination of sustainable integrated soil fertility management practices for smallholder farmers in sub-Saharan Africa. IFAD/TSBF/IFDC. Techn. Bull. IFDC - T71. IFDC, Muscle Shoals, AL (USA).
- Torquebiau, E., (eds) 2007. *L'agroforesterie des arbres et des champs*, L'Harmattan, 152 p.
- Tourte, R. et Billaz, R. 1982. Approches des systèmes agraires et fonction recherche-développement. Contribution à la mise au point d'une démarche. *Agronomie Tropicale*.
- Triomphe, B.L., 1996. Seasonal nitrogen dynamics and long-term changes in soil properties under the *Mucuna*/maize cropping system on the hillsides of northern Honduras. Ph. D dissertation. Cornell University, USA. 217 p.
- Tschannen, A.B., Escher, F. and Stamp, P., 2005. Post-harvest treatment of seed tubers with gibberellic acid and field performance of yam (*Dioscorea cayenensis-rotundata*) in Ivory Coast. *Experimental Agriculture*. 41: 175–186.

- van Asten, P.J.A., Wopereis, M.C.S., Haefele, S., Isselmou, M.O. and Kropff, M.J., 2003. Explaining yield gaps on farmer-identified degraded and non-degraded soils in a Sahelian irrigated rice scheme. *Netherland Journal of Agricultural Science*. 50, 277–296.
- van den Bosch, H., 1994. NUTMON: A Decision Support System for Sustainable Use of Soil Macronutrients in Kenya Farming Systems, Version 1.1. DLO Winand Staring Centre, Wageningen, The Netherlands.
- Van Dijk, H. 1980 - Survey of Dutch soil organic matter research with regard to humification and degradation rates in arable land in Land Use Seminar on Soil Degradation. Boel, D, Davies, DB et Johnston AE Eds. Wageningen, 13-15 octobre 1980, pp. 13-15.
- Vanlauwe, B. and Giller, K.E., 2006. Popular myths around soil fertility management in sub-Saharan Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 116, 34–46.
- van Noordwijk, M., Tomich, T.P., Winahyu, R., Murdiyarso, D., Partoharjono, S. and Fagi, A.M. (Eds.), 1995. Alternatives to slash-and-burn in Indonesia: summary report of Phase 1. Alternatives to Slash-and-Burn Agriculture (ASB)-Indonesia Report No. 4. ASB-Indonesia Consortium and ICRAF, Bogor, Indonesia.
- Vernier, P. and Dossou, R.A., 2000. Adaptation of yam (*Dioscorea* spp) cultivation to changing environment and economic constraints in Benin, Africa. In Proceedings of the 12th symposium of ISTRC. 2000. Tsukuba, Japan, 10-16/09/2000: ISTRC 2000. : 352-359
- Vernier, P. and Dossou, R.A., 2003. An example of sedentarization of yam cultivation. The case of Kokoro varieties in the Republic of Benin. *Atelier national sur le développement durable de la production et de la consommation de l'igname en Côte d'Ivoire*, 2001-10-23/2001-10-26, Abidjan, Côte d'Ivoire. *Agronomie africaine*, 15 (4, nu): 187-196.
- Versteeg, M. N., 1990. Pré-vulgarisation de la culture de Mucuna (*Mucuna pruriens* var *utilis*) pour contrôler l'imperata (*Imperata cylindrica*) et pour améliorer la fertilité du sol: publications et communications, INRAB, Cotonou, Bénin.
- Versteeg, M.N., Amadji, F., Etèka, A., Gogan, A. and Koudokpon, V., 1998. Farmers'adoptability of Mucuna fallowing and agroforestry technologies in the coastal savanna of Benin. *Agricultural Systems* 56: 269-287.
- Versteeg, M.N. and Koudokpon, V., 1993. Participative farmer testing of four low external input technologies, to address soil fertility decline in Mono province (Benin). *Agric. Syst.* 42, 265– 276.
- Vilain, L., 2003. La méthode IDEA : Indicateurs de durabilités des exploitations agricoles. Guide d'utilisation, (eds) educagri, 151 p.

- von Mulindabigwi, V., 2005. Influence des systèmes agraires sur l'utilisation des terroirs, la séquestration du carbone et la sécurité alimentaire dans le bassin versant de l'Ouémé supérieur au Bénin. Thèse de doctorat, Université de Bonn, 253p.
- Walker, T.S. and Subba Rao, K.V., 19982. Risk and the choice of cropping systems: hybrid sorghum and cotton in the Akola region of central peninsular india ICRISAT-Progress Report 43.
- Watson, K.A. and Goldsworthy, P.R., 1964. Soil fertility investigations in middle belt of Nigeria. *Empire Journal of Experimental Agriculture* 32 (128), 290-302.
- Webb, R.A., 1972. Use of boundary line in analysis of biological data. *J. Hortic. Sci.* 47, 309–319.
- Wilson, L.A., 1977. Root crops, 187-236, *In* Alvin, P.T. et Kozlowski, T.T. (ed) *Ecophysiology of tropical crops*. Academic Press, New York.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses to conservation planning. *Agricultural Handbook No. 537*. USDA, Washington, DC, USA, 58 pp.
- Woomer, P. L. and Swift, M. J., 1994. *The Biological Management of Tropical Soils Fertility*: John Wiley and Sons, New York, USA. 23pp.
- Wopereis, M.C.S. and Maatman, A., 2002. Improving farming livelihoods in sub-Saharan Africa: the case for integrated soil fertility management in : IFDC, Proc of the ISFM training, 7-12 Octobre, Lomé, IFDC-Division Afrique, 25 p
- Zannou, A., 2006. Socio-economic, agronomic and molecular analysis of yam and cowpea diversity in the Guinea-Sudan transition zone of Benin. PhD Thesis, Wageningen University, 246 pp.
- Zeller, M., 1994. Determinants of credit rationing: a study of informal lenders and formal credit groups in Madagascar. *World Development* 22, 1895–1907
- Zinsou, C., 1997. Physiologie et morphologie de l'igname (*Dioscorea* spp) – In : Acte de séminaire international : l'igname, plante séculaire et culture d'avenir – Cired-Inra-Orstom-Coraf, 3-6 juin 1997, Montpellier, France, pp 213-222.

CURRICULUM VITAE

Nom et Prénom: MALIKI Raphiou
Adresses: R-D Savè/CRA-Centre/INRAB, BP. 112; Savè,
Tél.: (229) 22 55 00 89 (Service);
(229) 97 90 90 39 ; B.P. 2128, Calavi (Bénin) (privé)
E-mail : malikird@yahoo.fr
Date et lieu de naissance: 23/06/1963 à Porto-Novo, Bénin
Nationalité: Béninoise
Situation matrimoniale: Marié
Langues écrites: Français et anglais
Fonction : Ingénieur Agronome- agroforestier,
Diplôme récent : D.E.A. en Aménagement et Gestion des
Ressources Naturelles (AGRN)

Expérience professionnelle (17 ans):

- Chercheur, Responsable de l'équipe de Recherche-Développement au Centre de Recherches Agricoles Centre (CRA-Centre) de l'Institut National des Recherches Agricoles du Bénin (INRAB) (à partir de 2011)
- Chercheur, membre de l'équipe de Recherche-Développement (R-D) au CRA-Centre de l'INRAB (2000- 2010).
- Consultant national du Projet de Coopération Technique FAO/TCP/BEN/3002 (A) intitulé " Production durable d'ignames de qualité adaptées à la demande du marché", financé par la FAO (2005-2007).
- Chercheur, membre du Programme Spécial de Recherche SFB 308 "Agriculture adaptée au milieu en Afrique de l'Ouest" de l'Université de Hohenheim (UNIHO)-Allemagne en collaboration avec l'Institut International d'Agriculture Tropicale (IITA) et l'INRAB (1993-1999).

Cursus scolaire et Universitaire :

- Etude doctorale (2008-2013) : Doctorant en Aménagement et Gestion des Ressources Naturelles (AGRN) bénéficiant d'une bourse du Gouvernement français gérée par l'organisme EGIDE (EGIDE-28, rue de la Grange aux Belles, à 75010 Paris) dans un système d'alternance entre la Faculté des Sciences Agronomiques (FSA) de l'Université d'Abomey-Calavi et le CIRAD (Centre international en Recherche Agronomique pour le Développement de Montpellier, PS4, production fruitière et horticole). Bénéficiant également dans le cadre de cette thèse d'un appui financier du Programme CORUS (Coopération en Recherche Universitaire et Scientifique).
- Cours Universitaire (2005-2006) pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies (D.E.A.) en Aménagement et Gestion des Ressources Naturelles (AGRN) à la Faculté des Sciences Agronomiques (FSA) de l'Université d'Abomey-Calavi (UAC) au Bénin.
- Cours Universitaire (1986-1992) pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur Agronome à la Faculté des Sciences Agronomiques (FSA) de l'Université d'Abomey-Calavi (UAC) au Bénin.
- Cours secondaire (1977-1985) : Attestation du BEPC et du BAC série C en 1985.
- Cours primaire (1972-1977): Attestation de CEPE.

Liste des publications

- Azehoun, P., Maliki, R., Doumbia, S. et Aïhou, K., 2007. Fiche technique sur la culture de l'igname en République du Bénin; *yam country profile for Republic of Benin, policy note for yam promotion in Benin*. FAO/TCP/BEN/3002 (A), INRAB/MAEP, Savè, Bénin, 32 p.
- Cornet, D., Amadji, F., Adjé, I.A., Maliki, R., Adiba, C., Douwirou, D., Vernier, P. et Coulibaly, O., 2009. Production durable d'igname dans un système de culture de semis direct sur couverture végétale (SCV) de *Pueraria*. Série Nouvelles Techniques. ISBN : 978-99919-328-2-8. INRAB/MAEP, CIRAD, FAO, Coopération française, IITA, Cotonou, Bénin, 53 p.
- Cornet, D., Amadji, F., Dossou, R.A., Maliki, R. et Vernier P., 2005. Intérêts des légumineuses herbacées pour une production durable d'igname en Afrique de l'Ouest. In, Ozier-Lafontaine, H., Ed., Proceedings of the 41th international meeting of the CFCS, Le Gosier, Guadeloupe.

- Deffo, V., Hounzangbé-Adoté, S., Maliki, R., Ould Ferroukh, H.H.M. et Torquebiau, E., 2004. Contraintes contingentes à l'adoption d'une technologie. Evaluation contingente des contraintes à la fertilisation des sols par le système maïs-mucuna-engrais minéraux au sud du Togo. *TROPICULTURA*, 22 (1) : 19-25
- Deffo, V., Hounzangbe-Adote, S., Maliki, R., Ould Ferroukh, H.H.M., Torquebiau, E. et Van Reuler, H., 2002. Options d'intensification durable des cultures vivrières au sud du Togo *African crop science journal*, 10 (3) : 239-249.
- Deffo, V., Hounzangbé-Adoté, S., Maliki, R. et Ould Ferroukh, H.H.M., 1999. Options d'intensification durable des cultures vivrières au sud du Togo, 132 p. Série de document de travail N° 83 Togo 1999; ICRA, Centre Agropolis Montpellier, France.
- Floquet, A.B., Maliki, R., Tossou, R.C., Tokpa, C., 2012. Évolution des systèmes de production de l'igname dans la zone soudano-guinéenne du Bénin. *Cah Agric* 21 : 427-37. doi : 10.1684/agr.2012.0597
- Floquet, A., Barbier, B., Maliki, R., Dossouhoui F. et Siaka, K., 2011. L'igname peut-elle être sédentarisée –étude empirique et prospective grâce à un modèle bioéconomique.
- Atelier thématique sur « Agronomie et Ecosystèmes » à Antananarivo (Madagascar) du 21 au 26 mars 2011, CORUS & AIRES-Sud, LRI/Université d'Antananarivo.
- Floquet, A., Maliki, R. and Cakpo Y., 2006. Seven years after the SFB 308 – Adoption Patterns of Agroforestry Systems in Benin. Contribution au Tropentag, Bonn, 11 au 13 Octobre 2006.
- Maliki R., Toukourou M., Sinsin B. and Vernier P., 2012. Productivity of yam-based systems with herbaceous legumes and short fallows in the Guinea-Sudan transition zone of Benin. *Nutrient cycling in Agroecosystems*. 92 (1), p. 9. DOI: 10.1007/s10705-011-9468-7.
- Maliki, R., Cornet, D., Floquet, A. and Sinsin, B., 2012. Agronomic and economic performances of yam-based systems with shrubby and herbaceous legumes adapted by smallholders. *Outlook on AGRICULTURE* Vol 41, No 3, 2012, pp 171–178 doi: 10.5367/oa.2012.0094
- Maliki, R., Sinsin, B. and Floquet, A.. 2012. Evaluating yam-based cropping systems using herbaceous leguminous plants in the savannah transitional agro-ecological zone of Benin. *Journal of Sustainable Agriculture* 36 (4), pp. 440-460. DOI: 10.1080/10440046.2011.646352
- Maliki, R., Sinsin, B., Floquet, A. and Parrot, L., 2011. Contingent Constraints of Soil Conservation Innovations: Case of Yam-Based Systems with Herbaceous Legumes in the

Guinea-sudan Transition Zone of Benin. Global Journal of Environmental Research 5 (3): 118-128.

- Maliki, R., Cornet, D., 2011. Performances agronomiques et économiques des technologies à base des légumineuses adaptées pour la sédentarisation de la culture de l'igname au Bénin. Lauréat dans cadre concours de posters scientifiques franco-béninois deuxième édition. Ambassade de France/IRD/CNRST Bénin.
- Maliki, R., Cornet, D. et Floquet, A., 2011. Performance agronomique et économique des systèmes de cultures à base d'igname adaptés par les producteurs intégrant les légumineuses herbacées et arbustives dans la zone soudano-guinéenne du Bénin. Atelier sur « Agronomie et Ecosystèmes » à Antananarivo (Madagascar) du 21 au 26 mars 2011, CORUS & AIRES-Sud, LRI/Université d'Antananarivo.
- Maliki, R., Dossou, R., Amadji, F., Adjé I., 2007. Agro-economic evaluation of minisett production system in Centre of Benin *in* Tropical Root and Tuber Crops : opportunities for Poverty Alleviation and Sustainable Livelihoods in the Developing world. Communication presented at thirteenth triennial Symposium of the International Society for Tropical Root Crops (ISTRC), November 9-14, 2003 Arusha, Tanzania, East Africa, 195-209 pp.
- Maliki, R., Amadji, F., Adjé, I., Aïhou, K. et Toukourou, M., 2007a. Production durable de l'igname de qualité dans un système de cultures intégrant l'*Aeschynomene histrix*.
- Référentiel technico-économique. ISBN : 978-99919-62-30-6. FAO/TCP/BEN/3002 (A), INRAB/MAEP, Cotonou, Bénin, 52 p.
- Maliki, R., Amadji, F., Adjé, I., Aïhou, K. et Toukourou, M. 2007b. Production durable de l'igname de qualité dans un système de cultures intégrant le *Mucuna pruriens var utilis*. Référentiel technico-économique. ISBN : 978-99919-62-31-3. FAO/TCP/BEN/3002 (A), INRAB/MAEP, Cotonou, Bénin, 54 p.
- Maliki, R., Amadji, F., Adjé, I. et Téblékou, K., 2007c. Remugo dunduuje geete der wakkati dudkihe ballaka "*Gliricidia sepium*" he "*Aeschynomene histrix*". Référentiel technico-économique en Peulh; ISBN : 978-99919-62-34-4. FAO/TCP/BEN/3002 (A), INRAB/MAEP, Cotonou, Bénin, 70 p.
- Maliki, R., Amadji, F., Adjé, I. et Téblékou, K., 2007d. Tevi dudo bena na ganji, Ðo ayikungban Ðokpo o ji xwe nabi Ðe kpo walo atin *Gliricidia sepium kpodo Aeschynomene histrix* kpan. Référentiel technico-économique en Fon. ISBN : 978-99919-62-32-0. FAO/TCP/BEN/3002 (A), INRAB/MAEP, Cotonou, Bénin, 69 p.

- Maliki, R., Amadji, F., Adjé, I. et Téblékou, K. 2007e. Shishe ishe ishù kpikpe fun igbakpikpe kpèlu ilana titun nikpa lilo asoleji bi Amuletashu (*Gliricidia sepium*) ati Agbilè (*Aeschynomene histrix*). Référentiel technico-économique en Yoruba. ISBN : 978-99919-62-31-3. FAO/TCP/BEN/3002 (A), INRAB/MAEP, Cotonou, Bénin, 60 p.
- Maliki, R., Amadji, F., Adjé, I. et Téblékou, K., 2007f. Tam gia duribu wò daburu mi bara *Gliricidia sepium* ka *Aeschynomene histrix* duri. Référentiel technico-économique en Bariba. ISBN : 978-99919-62-33-7. FAO/TCP/BEN/3002 (A), INRAB/MAEP, Cotonou, Bénin, 63 p.
- Maliki, R., Amadji, F., Adjé, I. et Téblékou, K., 2005. Production durable de l'igname de qualité dans un système de cultures à base de *Gliricidia sepium* et *Aeschynomene*. Référentiel technico-économique. ISBN, N°99919-51-85-7. AFD/PADSE/INRAB/MAEP, Cotonou, Bénin, 70 p. <http://www.cirad.bf/fr/igname.php>.
- Maliki, R., 2006. Sédentarisation de la culture d'igname et gestion durable des ressources naturelles dans la région centre du Bénin : développement participatif: contraintes, adoption et diffusion des technologies. Thèse MSc, Abomey-Calavi, UAC, 2006, 312 p.
- Maliki, R., Amadji, F. et Adjé, I., 2004. Stratégies de recherche pour l'Agriculture et le Développement Rural Durable : étude de cas de la région centrale du Bénin *in* atelier régional sur l'Evolution des Systèmes Agricoles vers l'Agriculture et le Développement Rural Durables (ARD-ESA), tenu à Bamako du 26 au 28 octobre 2004, Mali.
- Maliki, R., Amadji, F. et Adjé, I., 2004. Economic profitability of the improved yam-based systems for sustainable agriculture in the centre of the Benin (West Africa) *in* Tropical Root and Tuber Crops: opportunities for Poverty Alleviation and Sustainable Livelihoods in the Developing world. Communication presented at thirteenth triennial Symposium of the International Society for Tropical Root Crops (ISTRC), November 9-14, 2003, Arusha, Tanzania, East Africa.
- Maliki, R., Bernard, M., Padonou, E. et Englehart, C. 2003. Compétition entre arbustes et culture vivrière dans quelques systèmes agrosylvicoles dans le sud et le centre du Bénin. In Annales des Sciences agronomiques du Bénin (5) 1 : 45-66, 2003 ; ISSN 1659-5009, Université d'Abomey Calavi), Cotonou, Bénin.
- Maliki, R., Amadji, F., Adjé, I. et Englehart, C., 2002a. Besoins en main d'œuvre de quelques systèmes agroforestiers de la région des Collines au Centre du Bénin. Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin, N° 32-juin 2001, l'INRAB, Bénin.

- Maliki, R., Amadji, F., Adjé, I. et Englehart, C., 2002b. Impact agronomique de quelques systèmes agroforestiers dans la région des savanes au centre du Bénin. Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin, N° 35-Mars 2002, l'INRAB, Bénin.
- Maliki, R., Amadji, F., Adjé, I. et Englehart, C., 2000a. Quelques options de gestion de la fertilité des sols et de stabilisation des rendements dans la zone des savanes au centre du Bénin: contraintes à leur adoption. Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin N°28, INRAB, Bénin.
- Maliki, R., Amadji, F., Adjé, I. et Englehart, C., 2000b. Durabilité sociale de quelques systèmes agroforestiers de la région des collines au centre du Bénin. Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin, N° 30 Décembre 2000, l'INRAB, Bénin

